UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RENATA TREVELIN DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS COM REDUÇÃO DE ARRASTE POR INJEÇÃO DE ADITIVOS: EFEITOS DA BOMBA CENTRÍFUGA

VITÓRIA

2014

RENATA TREVELIN DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS COM REDUÇÃO DE ARRASTE POR INJEÇÃO DE ADITIVOS: EFEITOS DA BOMBA CENTRÍFUGA

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares.

VITÓRIA

2014

RENATA TREVELIN DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS COM REDUÇÃO DE ARRASTE POR INJEÇÃO DE ADITIVOS: EFEITOS DA BOMBA CENTRÍFUGA

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edson José Soares Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Rafhael Milanezi de Andrade Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro Universidade Federal do Espírito Santo

VITÓRIA

2014

Agradecimentos

A Deus, meu eterno agradecimento por ter guiado e iluminado meus caminhos para chegar até aqui.

Agradeço à minha família que sempre me deu forças e torceu por mim. Aos meus pais Jose Reinaldo da Silva e Eliete do Carmo Trevelin Silva, e ao meu irmão, Leonardo Trevelin da Silva, que sempre me apoiaram e me encorajaram a chegar até aqui, mesmo nas épocas de mau humor nos períodos de provas, sem o apoio de vocês eu nada seria!

Ao meu namorado, Rafael Stange, pelo amor, companheirismo e carinho nesses 7 anos juntos, por compreender e por sempre ter me dado ânimo e coragem pra continuar.

Ao meu professor e orientador, Edson José Soares, por ser fundamental no desenvolvimento desse trabalho e na minha formação acadêmica.

Ao professor Rogério Ramos, pelo espaço disponibilizado no Laboratório de Máquinas de Fluxos e por sempre ter me auxiliado nas dificuldades encontradas.

Ao LFFT – Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes da UCL – Faculdade do Centro Leste, pela parceria fundamental para a realização do trabalho.

Aos professores dos quais fui aluno ao longo do curso de Engenharia Mecânica, que contribuíram para minha formação, educadores que estiveram comigo nessa caminhada.

Aos meus amigos e colegas de classe, pelos anos de convivência e pelo apoio e auxílio nas horas difíceis.

Aos meus amigos Fabrício, Gustavo e Lucas, por sempre estarem presentes na realização desse trabalho, auxiliando nos inúmeros e cansativos testes.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP), em especial ao programa PRH-29, pela bolsa de estudos e pela oportunidade da ênfase na Indústria do Petróleo e Gás Natural.

Resumo

O fenômeno de redução de arraste por injeção de aditivos de alto peso molecular em escoamentos turbulentos, desperta o interesse de setores industriais e pesquisadores, pois possui vasta aplicabilidade em situações em que há perda significativa de energia em escoamentos e, portanto, vem sendo estudado há muitos anos. O primeiro a registrar o fenômeno foi Toms (1948), que utilizou polímeros de alto peso molecular em baixas concentrações, mostrando que o uso de tais aditivos em escoamentos turbulentos reduz significativamente o fator de atrito em relação ao solvente puro submetido às mesmas condições de escoamento.

Entretanto, os parâmetros que levam ao fenômeno ainda não são completamente compreendidos e merecem estudos mais complexos a fim de se conseguir explicar questões ainda pouco conhecidas como os mecanismos que levam a quebra da cadeia molecular e o desenvolvimento das estruturas turbulentas após a injeção de aditivos.

O presente trabalho trata de uma abordagem experimental para análise da degradação polimérica em escoamentos turbulentos com redução de arraste por adição de polímeros flexíveis de alto peso molecular e tem como foco a análise da influência de diversos fatores no mecanismo. Os testes são realizados em uma bancada experimental desenvolvida no Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo. O polímero utilizado para a maior parte dos testes foi o Óxido de Polietileno, PEO, em diferentes concentrações e pesos moleculares, sendo possível avaliar os efeitos que as variáveis concentração da solução polimérica (c), massa molecular (Mv) e passagem por bomba centrífuga afetam o mecanismo de degradação molecular, e também foi utilizada Poliacrilamida, PAM, a fim de comparar seus efeitos com o do PEO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Processo de formação da cadeia polimérica. (White e Mungal, 2008) 12 Figura 2-2 - Estiramento das moléculas dos polímeros provocado pelas tensões de 13 Figura 2-3 - Trajetórias de redução de arraste por adição de polímeros. White e Mungal 1008) (2008) 16 Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento. 17 Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013) 18 Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada. 20 Figura 3-2 - Tela principal do supervisório. 21 Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor. 22 Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 4-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função do a so
Figura 2-2 - Estiramento das moléculas dos polímeros provocado pelas tensões de Cisalhamento impostas pelo escoamento. (White e Mungal, 2008) 13 Figura 2-3 - Trajetórias de redução de arraste por adição de polímeros. White e Mungal 2008) 2008) 16 Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento. 17 Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013) 18 Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada. 20 Figura 3-2 - Tela principal do supervisório 21 Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor. 22 Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba zentrífuga 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos. 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função
risalhamento impostas pelo escoamento. (White e Mungal, 2008)
Figura 2-3 - Trajetórias de redução de arraste por adição de polímeros. White e Mungal 2008). 16 Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento. 17 Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013) 18 Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada. 20 Figura 3-2 - Tela principal do supervisório 21 Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor. 22 Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-1 - Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da 32 Figura 4-2 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga. 34 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido) 37 Figur
2008).16Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento.17Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013).18Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada.20Figura 3-2 - Tela principal do supervisório21Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor.22Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga23Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM.24Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q.27Figura 4-1 - Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da comada32Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste33Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga.34Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos.35Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido)37Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba37
Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento. 17 Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013) 18 Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada. 20 Figura 3-2 - Tela principal do supervisório 21 Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor. 22 Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-1 - Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da omada 32 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido) 37
Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013)
Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada
Figura 3-2 - Tela principal do supervisório
Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor. 22 Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5 - Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-1 - Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da omada 32 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga. 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido) 37 Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba 37
Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga 23 Figura 3-5- Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM. 24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ , e vazão, Q. 27 Figura 4-1- Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da comada 32 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido) 37
 Figura 3-5- Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM24 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ, e vazão, Q
 Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ, e vazão, Q
 Im fluido com massa específica, ρ, e vazão, Q
Figura 4-1- Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da 32 Jomada 32 Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, 37 Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba 37
Somada32Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste33Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba34Scentrífuga.34Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra35Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR,37Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba37
Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste 33 Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba 34 centrífuga 34 Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra 35 repetitividade dos experimentos. 35 Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, 37 Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba 37
Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba
24.5 Sentrífuga
Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos
repetitividade dos experimentos
Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido)
em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido)
Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba
centrífuga
Figura 4-7- Gráfico da vazão em função da rotação da bomba para água e solução com PEO
Figura 7-1 - Curvas das bombas centrífugas Dancor, modelo CAM-W6C (DANCOR)48
Figura 7-2 - Desenho técnico do vaso de pressão, empresa Engetank,

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Viscosidade cisalhante das soluções poliméricas	25
Tabela 3-2- Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido	30

SUMÁRIO

1	I	NTRODUÇÃO	9
	1.1	Motivação	9
	1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	11
2	E	STADO DA ARTE	12
3	А	BORDAGEM EXPERIMENTAL	20
	2 1		20
	3.1		20
	3.2 2.2	$\mathbf{D}_{\mathbf{P}} = \mathbf{C}_{\mathbf{A}} \mathbf{D}_{\mathbf{A}} \mathbf{C}_{\mathbf{A}} $	21 24
	3.5 3.4	PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	24 26
	2.5	C (1 cui o do fator de atrito e coeficiente de reducão de arraste DP	20 27
	3.5	CRITÉRIO DE EVCLUSÃO DE DADOS	27
	5.0	CRITERIO DE EACLUSÃO DE DADOS	
4	R	ESULTADOS	31
	4.1	VALIDAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	31
	4.2	TESTES PRELIMINARES	35
	4.3	ANÁLISE DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO E DA MASSA MOLECULAR NA REDUÇÃO I	DE
	ARR	ASTE	36
	4.4	ANÁLISE DO EFEITO DA BOMBA CENTRÍFUGA NA REDUÇÃO DE ARRASTE	
	4.5	ANÁLISE DO EFEITO DO TIPO DE POLÍMERO NA REDUÇÃO DE ARRASTE	42
5	C	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	44
6	R	FFFRÊNCIAS	45
U			
7	A	NEXOS	
	7.1	ANEXO 1 – ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM A MONTAGEM	
	EXP	ERIMENTAL	48
	7.	.1.1 Bomba:	48
	7.	1.2 Inversor de frequência:	49
	7.	1.3 Medidor de vazão magnético:	49
	7.	1.4 Compressor:	49
	7.	.1.5 Vaso de pressão:	49

7.1.6	Transmissores de pressão:	
7.1.7	Placas de aquisição de dados:	
7.1.8	Termopares:	53
7.1.9	Resistências térmicas:	53

1 Introdução

1.1 Motivação

O fenômeno de redução de arraste por injeção de aditivos vem sendo observado há muitos anos. Primeiramente, a técnica foi aplicada na indústria de papel e celulose, onde fibras em suspensão eram utilizadas para provocar o efeito. Porém, o primeiro a descrever o fenômeno foi Toms (1948), que utilizou polímeros de alto peso molecular em baixas concentrações, na ordem de 10 ppm, provando que o uso de tais aditivos em escoamentos turbulentos reduz significativamente o fator de atrito em relação ao solvente puro submetido às mesmas condições de escoamento.

A partir de então, a técnica de injeção de aditivos para redução de arraste despertou interesse de setores industriais e pesquisadores, por ser intrigante e de vasta e promissora aplicação para soluções em que há perda significativa de energia em escoamentos.

A primeira e mais famosa aplicação da técnica de redução de arraste em larga escala em dutos ocorreu a partir de 1979 no "Trans Alaska Pipeline" utilizado para transporte de óleo bruto com 48 polegadas de diâmetro e extensão de aproximadamente 1300 km, com 12 unidades de bombeamento. Segundo Motier et al. (1996), a injeção de uma solução de concentração na ordem de 1 ppm de polímero de elevado peso molecular em óleo a jusante das estações de bombeamento foi aplicada com intuito de aumentar a vazão, sendo alcançados ganhos na vazão de óleo bruto de até 30%. Com isso, foi dispensada a necessidade de implantação de novas unidades de bombeamento. A Figura 1.1 mostra a extensão do "Trans Alaska Pipeline".

A redução de arraste na indústria do petróleo é utilizada, principalmente, devido ao aumento da vazão a pressão constante, o que, consequentemente, possibilita o aumento da capacidade de transporte de óleo bruto. Além disso, outra vantagem na aplicação da técnica se deve ao fato de a redução de arraste ser acompanhada por uma redução na troca de calor, assim, a temperatura do óleo bruto se mantém elevada, favorecendo a baixa viscosidade e resultando em uma maior vazão.



Figura 1-1 - Estações de bombeamento da Trans Alaska Pipeline.

Além das aplicações na indústria de óleo e gás, a redução de arraste por injeção de polímeros tem aplicação em diversas outras áreas da engenharia, sendo as principais delas:

- Sistemas de combate a incêndio, para aumentar o alcance dos jatos e a vazão de água;
- Prevenção do transbordamento de sistemas de drenagem após fortes chuvas;

• Cascos de navios e corpos submersos, como submarinos, torpedos e foguetes de água, para reduzir o consumo de combustível e aumentar a velocidade;

- Hidrelétricas e em sistemas de irrigação, para aumentar a vazão de água;
- Pesquisas na área da medicina, como na supressão da aterosclerose e na prevenção da letalidade de choque hemorrágico.

Como visto, nos últimos anos o fenômeno de redução do fator de atrito tem despertado interesse de vários pesquisadores e vem sendo estudado em diversas áreas, tanto para publicações científicas quanto para aplicações práticas. Entretanto, apesar dos avanços conquistados na área o fenômeno ainda possui características pouco conhecidas, como os mecanismos de interação entre as longas cadeias moleculares dos polímeros e as estruturas do escoamento turbulento. Sabe-se que as interações entre os vórtices turbulentos e as moléculas

poliméricas são responsáveis pela redução de arraste, porém também provocam a quebra e degradação mecânica dessas macromoléculas, reduzindo a eficiência das soluções poliméricas. A compreensão de tal mecanismo é de grande importância para melhor entendimento do mecanismo e formulação de teorias mais consistentes a respeito de redução de arraste para, assim, desenvolver polímeros mais resistentes à degradação e formas mais eficientes de utilização dos mesmos.

Poucos trabalhos que observam a degradação do polímero em função do número de passes na tubulação são encontrados na literatura. Uma análise da degradação polimérica sobre a influência do peso molecular, concentração e efeito da bomba centrífuga, em função do número de passes da solução por uma tubulação, se faz necessário devido ao grande número de aplicações da técnica de redução de arraste em circuitos com recirculação.

1.2 Objetivos do trabalho

O presente trabalho visa contribuir para melhor conhecimento da redução de arraste e tem como objetivo avaliar a degradação polimérica em escoamentos turbulentos em tubos com redução de arraste por adição de polímeros flexíveis, por apresentar ampla aplicação na indústria do petróleo. Para tanto, foi utilizada uma bancada com controle de vazão, pressão e temperatura que possibilita a realização de experimentos que envolvem a medição da redução do fator de atrito provocada pela adição de diferentes polímeros de alto peso molecular em soluções de baixa concentração à base de água, sendo possível a análise da degradação mecânica desses aditivos quando submetidos aos acidentes de linha, passagem pela bomba centrífuga e números de passes em circuitos aberto.

Nos experimentos foram utilizadas soluções do polímero Óxido de Polietileno, PEO, em diferentes concentrações e pesos moleculares, sendo possível avaliar os efeitos que as variáveis concentração da solução polimérica (c), massa molecular (Mv) e passagem por bomba centrífuga afetam o mecanismo de degradação molecular, e soluções de Poliacrilamida, PAM, para a qual foram feitas comparações entre a degradação sofrida pela mesma e pelo PEO, em escoamento passando ou não pela bomba.

2 Estado da Arte

Por ser intrigante e de vasta aplicação em diversos setores, o fenômeno de redução de arraste por adição de polímeros vem sendo estudado há cerca de 65 anos. Apesar dos avanços e descobertas conquistados, muitos mecanismos continuam pouco conhecidos, principalmente a interação entre os vórtices turbulentos e as cadeias poliméricas.

O primeiro a retratar o fenômeno de redução de arraste, também conhecido como "Toms Effect", em publicações científicas foi Toms (1948), que em seus estudos em tubos de paredes lisas, observa que o aumento da concentração da solução de polimetilmetacrilato em monoclorobenzeno, implica no aumento da vazão da solução, para gradiente de pressão fixo. O autor observa ainda, que tal fenômeno é intensificado com aumento do número de Reynolds e está relacionado a escoamentos turbulentos.

A partir dos estudos de Toms, diversos autores vêm estudando e buscando explicar os mecanismos e interações que proporcionam a redução do fator de atrito por injeção de aditivos.

Para que a injeção do aditivo proporcione a redução de arraste esperada, algumas condições de escoamento devem ser atendidas. Sabe-se que, em escoamento laminar, a adição de polímeros praticamente não provoca redução de atrito, o que revela a forte ligação entre esse fenômeno e a turbulência. Porém a turbulência não é o único fator de influência sobre a redução de arraste.

Com a fixação de um determinado diâmetro de tubulação e dado número de Reynolds, podese observar a forte relação entre o tamanho da cadeia polimérica e a redução do atrito. Em nível molecular, um polímero é constituído por uma cadeia de monômeros que se ligam quimicamente, Figura 2.1. Quanto maior a cadeia polimérica, mais eficiente será a redução de arraste proporcionada pela adição do polímero no escoamento.



Figura 2-1 - Processo de formação da cadeia polimérica. (White e Mungal, 2008)

Durante o escoamento turbulento, a cadeia polimérica, antes relaxada, ou emaranhada em forma de novelo, é esticada devido às fortes tensões cisalhantes impostas pelos vórtices turbulentos, como mostrado na Figura 2.2. Quanto mais esticado estiver o polímero, maior será a redução de arraste proporcionada. Uma vez esticado, o polímero tenta relaxar novamente, o tempo necessário para que seu relaxamento ocorra é chamado de tempo de relaxação, σ_z . (White e Mungal, 2008).



Figura 2-2 - Estiramento das moléculas dos polímeros provocado pelas tensões de cisalhamento impostas pelo escoamento. (White e Mungal, 2008)

O tempo de relaxação do polímero está intimamente ligado a sua capacidade de reduzir arrasto. Matematicamente, para que o polímero proporcione uma redução de arraste satisfatória, seu tempo de relaxação é dado pela Equação 2.1. (ZIMM, 1956).

$$\sigma_z > \frac{\mu}{\rho(v_{*W})^2} \tag{2.1}$$

Onde, para polímeros lineares em solução, o tempo de relaxação é dado pela Equação 2.2.

$$\sigma_z \approx \frac{\mu \left(N^{\frac{3}{5}} a \right)^3}{\varphi T} \tag{2.2}$$

Onde *N* é o número de monômeros na molécula, *a* é o comprimento de um único monômero, φ é a constante de Boltzmann e *T* denota a temperatura da solução. Pela expressão pode-se notar, que além do número de monômeros e do comprimento de cada monômero, a temperatura é um dos parâmetros que influenciam a redução do arraste.

Nota-se experimentalmente que a atuação do polímero na diminuição do atrito tende a se iniciar quando o número de Weissemberg, dado pela Equação 2.3, atinge a unidade, mas tal critério de análise mostra-se vago e pouco eficiente.

$$\left(W_{e\tau} > \frac{\sigma_z \rho(v_{*w})^2}{\mu}\right) \tag{2.3}$$

Explicações detalhadas para o início de DR geralmente são divididas em duas classes baseadas nos efeitos de estiramento do polímero no escoamento, de acordo com White e Mungal (2008). A primeira classe se concentra nos efeitos viscosos, defendida por Lumley (1973), enquanto a segunda se concentra nos efeitos elásticos, proposta por Tabor e De Gennes (1986). A teoria viscosa defende que as macromoléculas dos polímeros são inicialmente esticadas na subcamada de transição, portanto, fora da subcamada viscosa, onde as tensões viscosas e turbulentas coexitem. Nessa região, os vórtices são capazes de esticar completamente as moléculas do polímero, provocando um significativo aumento de viscosidade extensional da solução. O aumento da viscosidade extensional nessa região provoca a supressão das flutuações turbulentas (que dissipam energia), o que causa aumento da camada de transição e retração no domínio turbulento, reduzindo o arraste. Diante dessa hipótese, o efeito da redução de arrasto seria sentido em quaisquer concentrações, mesmo as muito baixas. A teoria elástica considera que a energia elástica armazenada pelos polímeros parcialmente esticados é uma variável importante para a redução de arraste e o aumento da viscosidade é pequena e insignificante. O efeito do polímero é sentido apenas quando a energia elástica armazenada pelos polímeros parcialmente esticados se torna comparável com a energia cinética da subcamada viscosa numa escala de comprimento turbulento maior que a escala de Kolmogorov. O esticamento do polímero faz com que a cascata de Kolmogorov seja interrompida prematuramente impedindo que os vórtices se dividam em outros menores, causando uma retração do domínio turbulento e, consequentemente, redução de arraste. De acordo com essa teoria, seria necessária uma concentração mínima para que o efeito elástico da adição do polímero no escoamento ser sentido, pois a energia elástica acumulada nos polímeros é função da concentração.

Existem outros autores que tentam explicar o mecanismo de redução de arraste e influências das macromoléculas na turbulência. Savins (1964) propôs que um mecanismo em que a energia cinética dos movimentos turbulentos é armazenada pelas macromoléculas poliméricas, causando supressão da turbulência por uma resistência às instabilidades do escoamento é a causa da redução de arraste.

Dubief et al. (2004) apresentam uma proposta baseada na teoria elástica para descrever a interação das moléculas de polímeros flexíveis com o escoamento turbulento. Segundo os autores, durante o escoamento as moléculas extraem energia cinética dos vórtices enquanto

são esticadas quando giram em torno dos mesmos na região da subcamada de transição. A molécula é então forçada à região da subcamada viscosa, onde volta a encolher e cedendo a energia armazenada para o escoamento. Desta forma, as moléculas suprimem os vórtices, armazenando a energia cinética, enquanto cedem energia para o escoamento.

Outra questão altamente importante é o limite máximo da redução de arraste, comprovado por Virk et al. (1967) que realizaram estudos experimentais com diferentes soluções poliméricas em escoamentos em dutos. Foi observado que mantendo-se fixo o número de Reynolds, Re, o aumento da concentração, c, eleva os níveis de redução de arraste até um valor máximo possível, MDR, a partir do qual a solução é considerada saturada e a adição de maiores quantidades de polímero na solução não influencia mais na redução do fator de atrito. Fixando-se a concentração da solução, o aumento de Re inicialmente eleva a redução de arraste ao longo de uma trajetória única independente da concentração, que é alterada após certo Re, indicando o ponto a partir do qual a curva de redução de arraste margeia a Assíntota de Máxima Redução de Arraste. A interpretação da Assíntota de Virk ainda não é totalmente compreendida, as opiniões se dividem entre as teorias viscosa e elástica. Segundo White e Mungal (2008), de uma forma geral, os autores que defendem a teoria viscosa, como Virk (1975), Sreenivasan e White (2000), sugerem que MDR ocorre quando o efeito do polímero é sentido em todas as escalas do escoamento, fazendo a subcamada de transição se estenda por toda camada limite. Os pesquisadores que defendem a teoria elástica, como Warholic et al. (1999), Ptasinski et al. (2001) e Min et al. (2004), por sua vez, acreditam que MDR ocorre quando os tensores de Reynolds são reduzidos completamente e a turbulência passa a ser conduzida principalmente pelas flutuações das tensões poliméricas. Os valores de MDR são representados na Assíntota de Máxima Redução de Arraste, também chamada de lei de Virk ou assíntota de Virk, ilustrada na Figura 2.3, em coordenadas de Prandtl-von Karman.



Figura 2-3 - Trajetórias de redução de arraste por adição de polímeros. White e Mungal (2008).

Um aspecto fundamental para o assunto é o mecanismo de degradação do polímero, uma vez que a maior parte das soluções poliméricas eficientes na redução de arraste pode perder sua eficiência quando submetidas ao cisalhamento intenso e contínuo. A degradação polimérica corresponde à quebra das macromoléculas, devido às tensões exercidas pelo escoamento, seu mecanismo é extremamente complexo, envolvendo diferentes campos da ciência como química, mecânica dos fluidos não newtonianos e turbulência. A redução do número de monômeros das cadeias poliméricas afeta consideravelmente a eficiência da redução de arraste. Acredita-se que a perda na eficiência se deva a quebra das longas cadeias macromoleculares que se transformam em cadeias menores, causando queda na viscosidade da solução devido à redução do peso molecular do soluto.

Merrill e Horn (1984) estudam um escoamento extensional de soluções diluídas de poliestireno e utilizando técnicas de cromatografia de permeação em gel, constatam que as cisões poliméricas ocorrem próximas ao ponto médio das macromoléculas. Os autores sugerem, ainda, que a degradação ocorre quando as cadeias encontram-se esticadas e

alinhadas com o escoamento. A Figura 2.4 ilustra o mecanismo de estiramento e cisão de uma macromolécula submetida a escoamento turbulento.



Figura 2-4 - Estiramento e cisão de cadeia polimérica em escoamento turbulento.

Resultados experimentais apresentados por Choi et al. (2000), Nakken et al. (2001), Vanapalli et al. (2005) e Pereira e Soares (2012) mostram que, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, após um longo período de tempo, a redução de arrasto tende a um regime permanente, a partir do qual nenhuma degradação adicional é observada.

Paterson e Abernathy (1970) estudam os efeitos de concentração, massa molecular e número de Reynolds na degradação de soluções de óxido de polietileno como soluto, em escoamentos turbulentos em dutos, constatando que o aumento da concentração e da massa molecular

retarda o processo de degradação polimérica, enquanto o aumento do número de Reynolds o torna mais acentuado, resultados confirmados por Moussa e Tiu (1994) e Pereira e Soares (2012).

Estudos revelam que, em um escoamento com número de Reynolds constante, a eficiência da solução em reduzir o arrasto varia com o tempo, como ilustra a Figura 2.5.



Figura 2-5 - Redução de arraste em função do tempo. Pereira et al (2013)

Logo após a injeção do polímero no escoamento turbulento é observado que o fator de atrito apresentado pela solução é maior que o do soluto, apresentando um DR negativo. Estudos realizados por Dimitropoulos et al. (2005) por meio de simulações numéricas, indicam que esse aumento de arraste está relacionado a uma rápida remoção de energia do escoamento nos instantes iniciais, devido ao estiramento abrupto das macromoléculas, o efeito é sentido como um aumento de viscosidade extensional da solução, o que provoca um aumento do fator de atrito. Experimentos realizados por Elbing et al. (2011) e Pereira e Soares (2012) mostram que o tempo necessário para o escoamento atingir a máxima redução de arrasto, DRmax, chamado tempo de desenvolvimento, t_d, é maior do que o tempo de estiramento das macromoléculas. Os autores argumentam que, após o abrupto estiramento das moléculas no início do processo, as interações entre estiramento do polímero e os vórtices turbulentos levam certo tempo para se sincronizar, sendo assim, o estiramento médio máximo das macromoléculas e DR_{max} são defasados. Pode-se observar, ainda, na Figura 2.5 que DR_{max} é mantido por certo período, chamado de tempo de resistência, t_r, a partir do qual, observa-se uma queda da eficiência de redução de arraste, devido à degradação mecânica das macromoléculas. Após certo período de tempo denominado tempo de assíntota, t_a, a redução de arraste assume um valor assintótico, DR_{assint} . Os autores argumentam que o tempo de assíntota é consideravelmente longo, porque nem todas as moléculas são esticadas e quebradas ao mesmo tempo, algumas sofrem esforços maiores e degradam, outras não. Como a degradação é gradual, presume-se que, durante o tempo de resistência, a redução de arraste é mantida em seu patamar máximo pelas moléculas ainda não degradadas. Com a contínua degradação, a eficiência do polímero cai e a turbulência torna a se intensificar até atingir um regime permanente, em que não se observa mais degradação do polímero.

Apesar dos vários trabalhos desenvolvidos na área de redução de arraste e da evolução alcançada na área nos últimos anos, muitos aspectos ainda carecem análise e explicação. A motivação deste trabalho é além avaliar do efeito de massa molecular, concentração e número de Reynolds, analisar o efeito da bomba centrífuga na degradação do polímero, como principal contribuição.

3 Abordagem experimental

3.1 Caracterização do problema

O presente trabalho estuda experimentalmente a redução de arraste proporcionada por polímeros de alto peso molecular em escoamentos turbulentos e a degradação mecânica da solução polimérica durante o escoamento. Investiga-se a redução do fator de atrito para o Óxido de Polietileno, PEO, e para a Poliacrilamida, PAM. Além da análise da influência de diferentes concentrações e pesos moleculares, é feita uma comparação entre a degradação sofrida pelos dois tipos de polímeros quando o escoamento é mantido apenas por ar comprimido e quando é usada uma bomba centrífuga, grande fonte de degradação.

Os experimentos são realizados numa bancada experimental montada no Laboratório de Máquinas de Fluxo e os estudos de parâmetros reológicos da solução são avaliados no Laboratório de Reologia, ambos da Universidade Federal do Espírito Santo.

São avaliados níveis de redução de arraste em função do número de passes (Np) da solução pela seção de testes da bancada experimental. Um passe é determinado pela passagem de todo o fluido contido no vaso de pressão para o reservatório, passando ou não pela bomba centrífuga, conforme Figura 3.1.



Figura 3-1 - Desenho esquemático para ilustrar um passe pela bancada.

3.2 Descrição da bancada experimental

Os testes para determinação experimental do fator de atrito são realizados em uma bancada controlada por meio de um supervisório desenvolvido sob a plataforma LabView, apresentado na Figura 3.2. Os sinais de pressão, medidos nos transdutores de pressão estáticos, e vazão, obtidos no medidor de vazão magnético, são adquiridos por uma placa de aquisição de dados NI-6008 e armazenados no banco de dados do LabView, de onde podem ser extraídos os dados necessários no momento exato do teste. Os sinais de temperatura, tomados dentro do vaso de pressão e no início e fim da seção de testes, são apanhados por um módulo de entrada analógica para termopar NI-9211 e também são armazenados no banco de dados do LabView. O supervisório conta com algoritmos de controle multivariável para estabilizar a vazão nos estados que serão efetuados os testes. O controle das variáveis auxilia na redução de incertezas experimentais.



Figura 3-2 - Tela principal do supervisório

A bancada é constituída basicamente por trechos de tubos de aço galvanizado de 16,35 milímetros de diâmetro interno ligados em série por meio de flanges para garantir a intercambialidade e isolados termicamente para evitar troca de calor com o meio. Na região de tomadas de pressão foi usado aço inoxidável no qual foi realizado brunimento interno para garantir diâmetro constante e conhecido, este trecho de tubo de 1400 milímetros de comprimento foi projetado e fornecido pelo LFFT – Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes da UCL – Faculdade do Centro Leste. O comprimento do trecho a montante das tomadas de pressão e do medidor de vazão é suficiente para garantir um escoamento inteiramente desenvolvido na região de medição de perda de carga e vazão. Os desenhos esquemáticos da bancada quando operada com compressor e com bomba estão representados nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.



Figura 3-3 - Desenho esquemático da bancada para operação com compressor



Figura 3-4 - Desenho esquemático da bancada para operação com bomba centrífuga

A bancada pode ser operada em circuito aberto ou fechado, conforme o teste a ser realizado (relação entre número de passes e degradação do aditivo ou o tempo de escoamento e degradação do aditivo, respectivamente). Para operação em circuito aberto a solução deixa o vaso de pressão e é depositada no reservatório no final da seção de testes, e para a operação em circuito fechado a solução é mantida recirculando no sistema, deixando o vaso de pressão e retornando para o mesmo, sem passar pelo reservatório. O escoamento pode ser mantido pela bomba centrífuga (que pode ser usada para os dois tipos de circuito, abeto ou fechado) ou por ar comprimido alimentado pelo compressor (no caso de circuito aberto).

Para o caso em que o compressor é utilizado, o pulmão é totalmente vedado e pressurizado com auxílio de uma válvula reguladora de pressão e a bomba é substituída por uma curva de 90°. Sabe-se, que devido às características construtivas da bomba centrífuga, esta se mostra grande fonte de degradação do polímero, desta forma é necessário que os testes realizados com a bomba sejam comparados com testes tendo o compressor como agente fornecedor de energia cinética ao fluido de trabalho (ar comprimido movimentando a solução), representando o caso no qual a degradação por efeito de bombas é nula, para, assim, avaliar a influência da bomba centrífuga na degradação polimérica.

Os principais elementos que a constituem são: uma bomba centrífuga, um inversor de frequência, um compressor, um medidor de vazão magnético e três transdutores de pressão estáticos. As informações técnicas de cada um dos equipamentos encontram-se no Anexo 1.

3.3 Preparo e caracterização das amostras

Os polímeros utilizados nos testes foram o Óxido de Polietileno, PEO, e a Poliacrilamida, PAM, ambos fornecidos pela Sigma- Aldrich. Foram empregadas soluções de duas diferentes massas moleculares de PEO: $M_{v1}=4x10^6$ g/mol e $M_{v1}=5x10^6$ g/mol; e uma de PAM: $M_{v3}=5x10^6$ g/mol. Pereira (2012) utiliza o mesmo aditivo em seu trabalho e para avaliar o peso molecular fornecido pelo fabricante, o autor utiliza o procedimento descrito por Flory (1971) concluindo que os valores do peso molecular fornecidos pelo fabricante estavam corretos.

É importante salientar as características dos polímeros aqui analisados. O Óxido de Polietileno, PEO, é um polímero sintético de cadeia linear e flexível, solúvel em água, cristalino, termoplástico e não-iônico. Incomum a outros polímeros, o PEO é encontrado em uma grande extensão de massas moleculares, sendo duas delas abordadas neste trabalho. Por possuir em sua estrutura unidade hidrofóbica (etileno) e hidrofílica (oxigênio), o PEO apresenta algumas características peculiares com ser solúvel em uma ampla variedade de solventes orgânicos e em água. É amplamente empregado em estudos de redução de arrasto, devido aos altos níveis de DR alcançados. O aditivo é obtido da polimerização do óxido de etileno (éter cíclico, C_2H_4O), a fórmula estrutural do PEO é apresentada na Figura 3.5-A. A Poliacrilamida, PAM, assim como o Óxido de Polietileno, é um polímero sintético de cadeia linear e flexível, solúvel em água, e também largamente utilizado em estudos de redução de arraste. O aditivo é sintetizado a partir da polimerização da acrilamida, como mostrado na Figura 3.5-B.



A - Óxido de Polietileno

B - Poliacrilamida

Figura 3-5- Fórmula estrutural do Óxido de Polietileno, PEO, e da Poliacrilamida, PAM.

Cada amostra de solução polimérica de 150 litros utilizada para cada teste é preparada cuidadosamente para evitar contaminação e degradação precoce do polímero. Primeiramente, o polímero é pesado em uma balança analítica e divido em três partes iguais, que são

depositadas cuidadosamente em três recipientes contendo 50 litros de água filtrada cada. Os recipientes são lacrados e deixados em ambiente com temperatura controlada de 25°C para evitar degradação polimérica pelo efeito de temperatura ou microrganismos. Foi verificado por meio de testes de viscosidade em reômetro que o tempo suficiente para total diluição da amostra é de 72 horas.

A massa específica foi obtida de amostras de solução retiradas antes dos testes por meio do método de picnometria a 27°C realizado em picnômetro calibrado. A viscosidade foi obtida por teste reológico realizado em um reômetro onde foi utilizado recipiente de geometria dupla folga.

Na Tabela 2.1 a seguir estão listados os valores de viscosidade cisalhante obtidos em função da concentração da solução, c, massa molecular, Mv, e temperatura a uma temperatura de 27°C, mesma temperatura de realização dos testes, para cada amostra diluída em água filtrada, AF.

Solvente	Polímero	Mv (g/mol)	c (ppm)	η (mPa.s)
AF	-	-	-	0,852
AF	PEO	4x10 ⁶	25	0,862
AF	PEO	4x10 ⁶	50	0,914
AF	PEO	4x10 ⁶	75	0,921
AF	PEO	4x10 ⁶	100	0,973
AF	PEO	5x10 ⁶	25	0,926
AF	PEO	5x10 ⁶	50	0,951
AF	PEO	5x10 ⁶	75	0,967
AF	PAM	5x10 ⁶	50	0,904

Tabela 3-1 - Viscosidade cisalhante das soluções poliméricas

3.4 Descrição dos experimentos

Para análise do efeito da massa molecular e concentração, os testes foram realizados utilizando-se Óxido de Polietileno de diferentes pesos moleculares ($M_{v1}=4x10^6$ e $M_{v2}=5x10^6$ g/mol) e concentrações (25, 50, 75 e 100 ppm) e para análise da influência do tipo de polímero na redução de arraste e degradação foram utilizadas soluções de Óxido de Polietileno, $M_{v1}=4x10^6$ g/mol, e Poliacrilamida, $M_{v2}=5x10^6$ g/mol, ambos a concentração de 50 ppm. Todas as amostras foram diluídas em água filtrada. Antes da realização dos testes retirou-se uma amostra da solução para obtenção das propriedades de massa específica e viscosidade, utilizada nos cálculos de fator de atrito. Assim que a amostra do fluido é retirada, a solução é então depositada no vaso de pressão para que se inicie o teste.

Para os testes em que o escoamento é mantido por ar comprimido mantido pelo compressor, o vaso de pressão é pressurizado e quando se atinge a pressão requerida para o teste, o mesmo tem início abrindo-se a válvula de contenção que liga o vaso de pressão a seção de teste. O experimento é realizado mantendo a pressão constante no compressor.

Já para os testes realizados com auxílio da bomba não há pressurização do vaso de pressão. Assim que a solução está no vaso de pressão, ajusta-se a vazão requerida para o teste no supervisório, abre-se a válvula de contenção na saída do vaso de pressão e inicia-se o passe.

A cada passe pela bancada, a solução deixa o vaso de pressão e é encaminhada para um reservatório secundário localizado no final da seção de teste. Assim que toda a solução que estava no vaso de pressão passa pela seção de teste e chega ao reservatório, é dado o fim de cada passe. É, então, feito o retorno da solução para o vaso de pressão para dar início ao próximo passe. No caso em que é utilizado o compressor, é necessário despressurizar o vaso de pressão antes de abrir o retorno. A despressurização é feita por uma válvula de gás localizada na parte superior do vaso.

O retorno da solução é realizado por uma tubulação de 1,5 polegadas (diâmetro maior que a seção de teste) que liga reservatório ao vaso de pressão. Tal tubulação possui certa inclinação permitindo que a solução retorne ao vaso movida pela força de gravidade.

Sucessivos passes são realizados, podendo assim, ser analisado o aumento do fator de atrito devido à degradação polimérica à medida que a solução é submetida ao escoamento na seção de testes.

A análise do fator de atrito se dá por meio das medições de pressão estática obtidas em três pontos equidistantes entre si ao longo do comprimento da seção de teste, obtendo-se assim $\frac{\partial \overline{P}}{\partial x}$, para uma dada vazão mássica (e, por conseqüência, para um dado R_e), tomando-se um perfil de velocidade desenvolvido.

3.5 Cálculo do fator de atrito e coeficiente de redução de arraste, DR

Os dados experimentais utilizados para o cálculo do fator de atrito neste trabalho foram a velocidade do fluido na seção de teste, a diferença de pressões entre dois pontos e a viscosidade e massa específica das soluções.

Um tubo circular de diâmetro D, no qual um fluido com massa específica ρ e viscosidade η , é submetido a escoamento entre dois pontos, 1 e 2, a uma vazão volumétrica Q e diferença de pressão entre os pontos igual a $\Delta p = p2 - p1$ é representado na Figura 3.6.



Figura 3-6 - Representação de um tubo horizontal com diâmetro, D, onde se dá escoamento de um fluido com massa específica, ρ, e vazão, Q.

A equação de perda de carga entre os pontos 1 e 2 do tubo pode ser representada pela Equação 2.1:

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2}{2} + gz_2\right) = h_t$$
(2.1)

Em que p_1 e p_2 são as pressões estáticas, $\overline{V_1}$ e $\overline{V_2}$ as velocidades médias e z_1 e z_2 as coordenadas verticais nos pontos 1 e 2, respectivamente, g é a aceleração local da gravidade e h_t a perda de carga total.

A perda de carga total, h_t , é considerada como a soma das perdas distribuídas, h_d , devido aos efeitos de atrito no escoamento desenvolvido em tubos de seção constante, com perdas de

carga localizadas, h_l , devido às entradas, saídas, acessórios, mudanças de área, etc. Considerando que não há nenhum acessório entre os pontos 1 e 2, pode-se considerar a perda de carga localizada como nula no trecho. Assim, a perda de carga total engloba apenas as perdas distribuídas. Ao considerar que o tubo é horizontal e de área constante, as coordenadas z_1 e z_2 são iguais, assim como as velocidades médias $\overline{V_1}$ e $\overline{V_2}$. Logo, a Equação 2.1 se resume a Equação 2.2.

$$\left(\frac{p_1 - p_2}{\rho}\right) = \frac{\Delta p}{\rho} = h_t \tag{2.2}$$

No escoamento turbulento inteiramente desenvolvido, a queda de pressão devido ao atrito, num tubo horizontal de área constante, depende do diâmetro do tubo, D, do comprimento da seção, L, da rugosidade, *e*, da velocidade média, \overline{V} , da massa específica, ρ , e da viscosidade, η , do fluido, conforme a Equação 2.3.

$$\Delta p = \Delta p(D, L, e, V, \rho, \eta) \tag{2.3}$$

Ao aplicar análise dimensional, a relação entre os parâmetros pode ser demonstrada pela Equação 2.4.

$$\frac{\Delta p}{\rho \bar{\nu}^2} = g\left(\frac{\eta}{\rho \bar{\nu}_D}, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right)$$
(2.4)

A partir da manipulação dos parâmetros adimensionais, obtém-se a expressão do fator de atrito, f, como função dos parâmetros adimensionais: número de Reynolds, Re, e rugosidade relativa, ε , conforme a Equação 2.5.

$$f(Re,\varepsilon) = \frac{2D(\Delta p/L)}{\rho \overline{V}^2}$$
(2.5)

Em que Re para um caso geral e ε são definidos pelas equações 2.6 e 2.7, respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \tag{2.6}$$

$$Re = \frac{\rho \overline{V} D}{\mu} \tag{2.7}$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

O fator de atrito para escoamentos turbulentos de fluidos newtonianos pode ser calculado utilizando correlações experimentais. Para o presente trabalho foi utilizada a correlação de Blasius, representada pela Equação 2.8.

$$f_0 = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \tag{2.8}$$

O fator de atrito mínimo, que se dá quando a máxima redução do fator de atrito, MDR, é atingida pode ser dada pela Equação 2.9 proposta por Virk (1975).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9,5 \log\left(\frac{Re\sqrt{f}}{2}\right) - 16,2 \tag{2.9}$$

Para o cálculo da redução de arraste, DR, é utilizada a Equação 2.10 proposta por Lumley (1973).

$$DR = 1 - \frac{f}{f_0}$$
(2.10)

Em que f é o fator de atrito obtido na solução aditivada e f_0 é o fator de atrito do solvente para um mesmo número de Reynolds.

3.6 Critério de exclusão de dados

É comum que em experimentos sejam medidos alguns valores que extrapolam a tendência dominante. Estes valores podem ser, de fato, medições erradas, como podem também representar certo fenômeno físico de interesse. Por este motivo, estes valores que fogem à tendência dominante não podem ser descartados sem recorrer a critério consistente para sua eliminação.

Um desses critérios que é muito utilizado em experimentos é o critério de Chauvenet, utilizado para exclusão de dados nesse trabalho. Sejam n medições de uma grandeza, onde n é um valor suficientemente de modo que os resultados seguem uma distribuição Gaussiana. Esta distribuição fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado de certo valor da média esperada. Não se pode esperar probabilidade menor que 1/n. Assim, se a probabilidade para o desvio de certo valor medido é menor que 1/n, pode-se qualificá-lo para ser eliminado do conjunto de dados. Segundo o critério de Chauvenet, um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade m de obter o desvio em relação à média é menor que 1/2n.

A Tabela 3.2 a seguir lista valores da razão do desvio em relação ao desvio padrão para vários valores de *n* conforme este critério.

Quantidade de pontos da amostra (n)	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão.
	(d _{max} /σ)
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Tabela 3-2- Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores duvidosos, em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela 3.2, para assim se eliminar os pontos duvidosos. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados.

No experimento, as variáveis de vazão e pressão são obtidas por uma placa de aquisição de dados da National Instruments NI-6008 e os valores obtidos são armazenados num banco de dados desenvolvido na plataforma NI-Max. Para cada passe, o tempo de aquisição de dados é de cerca de 60 segundos, sendo aquisitados pontos em intervalos de 0,5 segundos, dessa forma, são obtidos 120 dados para cada variável a cada passe. Dessa forma, neste trabalho, de acordo com a tabela, foi utilizado o valor de razão entre desvio máximo aceitável e desvio padrão de 2,81, onde valores com desvio superior são excluídos.

4 Resultados

4.1 Validação da bancada experimental

Antes de se iniciar os testes de análise de redução de arraste, é necessário que se façam testes com resultados conhecidos na bancada para garantir que a mesma se encontra calibrada e que, portanto, proporciona resultados confiáveis. Além disso, também é necessário testar se os principais instrumentos de medição de parâmetros como os transdutores de pressão e o medidor de nível se encontram calibrados e corretamente instalados.

Para garantir que as medidas de pressão fossem tomadas em escoamento turbulento completamente desenvolvido, foram instalados três pontos de tomadas de pressão equipados com medidores de pressão estática com uma incerteza de 0,01% do valor medido fornecidos pelo fabricante Warme. O primeiro ponto de medida de pressão, tomado como referência para cálculo da pressão diferencial, foi instalado a uma distância $x_0 = 22D$ do flange da entrada do tubo de teste, onde D é o diâmetro do tubo. A queda de pressão é obtida através da diferença entre as pressões estáticas medidas em cada uma das outras duas tomadas de pressão e a referência, sendo a distância entre as tomadas de 500 mm. Para cada tomada de pressão foi realizado um furo de 2,0 mm de diâmetro no qual foi soldado um tubo de aço inoxidável de 1/8 polegadas de diâmetro interno, com comprimento de 30 mm para a montagem da mangueira a quais é conectada o transdutor de pressão. Para garantia do diâmetro interno, garantindo diâmetro interno do tubo constante e conhecido e bom acabamento superficial.

Para verificar o funcionamento dos transdutores de pressão após a montagem, um conjunto de testes foi realizado com intuito de observar a queda de pressão em função da posição dos transdutores. Para cada teste utilizou-se água filtrada em três vazões diferentes a temperatura de 27°C. Os resultados são apresentados na Figura 4.1, onde é possível observar uma queda de pressão constante (coeficiente de correlação, $R^2 \ge 0.99$), comprovando escoamento completamente desenvolvido na seção e demonstrando que a montagem dos transdutores está adequada.



Figura 4-1- Gráfico representativo das pressões nos três pontos em função da posição da tomada

Outro parâmetro primordial para determinação da redução de arraste é a medição de vazão. Para medir tal variável, foi utilizado um medidor do tipo magnético modelo Rosemount 8732 fabricado pela Emerson Process que apresenta baixas perda de carga e perturbação do escoamento. Para garantir que as medidas de vazão estejam em regime permanente, foram realizados testes para avaliar o comportamento da vazão com o tempo de experimento de modo a se conhecer o intervalo de tempo em que as medidas de vazão e pressão poderiam ser tomadas. Os resultados estão representados na Figura 4.2, considerando aceitável um erro de 2% em torno da vazão média, é possível identificar regime permanente após 30 segundos a partir do início do teste, sendo assim, as aquisições de dados de vazão e pressão devem ser realizadas após esse tempo de estabilização do escoamento.



Figura 4-2 - Gráfico de vazão em função do tempo de teste

Depois da realização dos testes para identificar a confiabilidade do medidor de vazão e transdutores de pressão utilizados na bancada, foram feitos testes com água filtrada para diversos números de Reynolds, desde cerca de 30.000 a 100.000, todos em regime turbulento. O fator de atrito experimental foi calculado a partir da Equação 2.5, sendo comparado com o fator de atrito de Blasius para tubulação lisa. Os resultados são representados na Figura 4.3. O teste utilizando compressor foi realizado por múltiplos passes, para os quais a pressão na saída do compressor para o vaso de pressão é alterada, podendo, assim, obter uma ampla faixa de números de Reynolds. Para o teste operado com a bomba centrífuga, também foram realizados múltiplos passes, mas para esse caso o número de Reynolds varia conforme se modifica a rotação da bomba.

Observando-se a Figura 4.3 é notável que os valores encontrados nos testes estão próximos aos valores teóricos tomando como referência a curva de Blasius. O erro máximo encontrado



entre a curva de Blasius e os dados experimentais para a água foi da ordem de 6% tanto para os testes realizados com compressor como com a bomba centrífuga.

Figura 4-3 - Gráfico do teste de validação da bancada com compressor e com bomba centrífuga.

O objetivo do teste, além de garantir os resultados por meio de comparação com valores conhecidos, também é calcular o fator de atrito do solvente utilizado nos testes para redução de arraste. Os valores de fator de atrito calculados para o solvente são utilizados como base para cálculo do DR das soluções aditivadas.

4.2 Testes preliminares

Após a validação da montagem experimental a partir da comparação dos resustados obtidos em testes com água com correlações conhecidas, a fim de garantir a aferição dos valores, foram realizados três testes experimentais utilizando solução de PEO com massa molecular de $4x10^6$ g/mol e concentração de 25 ppm, a temperatura de 27° C, a fim de avaliar a repetitividade da planta experimental.

Para a realização destes testes a pressão manométrica no vaso foi mantida constante 400 kPa e foram realizados dezesseis passes da solução pela bancada. Em função da degradação polimérica e consequente diminuição na eficiência para redução de arraste, a faixa de número de Reynolds encontrado foi de cerca 145.000 no primeiro passe e cerca de 113.000 no último.

Os resultados obtidos nos testes são representados na Figura 4.4, onde se pode verificar a proximidade dos resultados encontrados para os três testes, confirmando a estabilidade das medições e repetitividade dos experimentos.



Figura 4-4 - Redução de arraste, DR, em função do número de passes, Np, que mostra repetitividade dos experimentos.

4.3 Análise do efeito da concentração e da massa molecular na redução de arraste

Experimentos realizados por Solomon et al. (2008) buscam mensurar o quanto a cadeia molecular dos polímeros usados como aditivos para redução de arraste tende a se romper quando a solução é submetida a escoamento por um circuito de tubulação diversas vezes. Para tanto os autores fizeram teste com óxido de polietileno, PEO, a concentração de 100 ppm, realizando dezesseis passes pela tubulação. Notou-se que com o aumento do número de passes da solução pelo circuito, a degradação do polímero aumenta, chegando a um valor em que a redução de arraste se mantém estável.

O teste apresentado na Figura 4.5 (Sandoval et al., 2014, submetido), a seguir, foi realizado pelo grupo de estudos de redução de arraste da Universidade Federal do Espírito Santo, orientado pelo professor Edson Jose Soares, e demonstra o comportamento da redução de arraste em função do número de passes da solução pela bancada experimental. No teste foi utilizado PEO em dois pesos moleculares diferentes, $M_{v1}=4x10^6$ g/mol e $M_{v2}=5x10^6$ g/mol, a concentrações de 25, 50, 75 e 100 ppm, onde foi utilizado ar comprimido alimentado por um compressor como fonte de energia cinética ao fluido. Durante o teste a pressão no compressor foi mantida constante e igual a 25 kPa manométrica e a temperatura igual a 27°C. Para cada teste foram realizados quarenta passes.

Observa-se a redução de arraste é maior para o primeiro passe e diminui com o número de passes. A diminuição da eficiência do polímero para reduzir arraste é mais acentuada nos primeiros passes do teste, tendendo a um estado de equilíbrio nos últimos passes, nos quais a redução de arraste assume um valor assintótico. Acredita-se que a redução de arraste permaneça neste valor assintótico durante um período considerável, uma vez que nem todas as moléculas são esticadas e quebradas ao mesmo tempo, algumas sofrem esforços maiores e degradam, outras não. Como a degradação é gradual, presume-se que a redução de arraste é mantida em um patamar mínimo pelas moléculas ainda não degradadas, em que não se observa mais degradação do polímero.



Figura 4-5 - Efeito do peso molecular e concentração da solução na redução de arraste, DR, em função no número de passes, Np. (Sandoval et al. 2014, submetido)

É possível avaliar que a redução de arraste aumenta para concentrações mais elevadas como reportado por Lumley (1973), Vanapali (2005), Virk (1975) e Pereira e Soares (2012). Para solução de PEO com $M_{v1}=4x10^6$ g/mol c= 100 ppm é observada uma redução de arraste máxima da ordem de 65%, enquanto que para uma solução de c = 25 ppm para o mesmo polímero, foi obtida uma redução de arraste máxima da ordem de 50%. É possível visualizar, também, o aumento da redução de arraste mínima (observada quando a mesma tende a um valor assintótico) com o aumento da concentração, mesmo efeito observado por Pereira e Soares (2012) e Pereira et al. (2013). Para as concentrações utilizadas não foi possível determinar a concentração crítica, na qual a solução se encontra saturada e a partir da qual o aumento da concentração não implica em aumento da redução de arraste.

O aumento da redução de arraste em concentrações mais elevadas pode ser explicado por dois motivos. O primeiro baseia-se na hipótese de que o aumento da concentração eleva o número de macromoléculas disponíveis para suprimir os vórtices turbulentos, Elbing et al. (2011). O

segundo explica que o aumento da concentração eleva a viscosidade extensional da solução, o que causa uma diminuição na taxa de extensão e por consequência, menor esforços sobre cada macromolécula, reduzindo a degradação e aumentando a eficiência de redução de arraste, Merril e Horn (1984).

Quanto ao efeito da massa molecular, é possível observar para concentração de 25 ppm que o aumento da massa molecular implica em aumento de redução de arraste, porém para as concentrações mais altas esse efeito é praticamente nulo, o que indica que a diferença de massa molecular tem maior influência nas concentrações mais baixas.

4.4 Análise do efeito da bomba centrífuga na redução de arraste

Com a finalidade de avaliar o efeito da bomba centrífuga na degradação dos polímeros, foram realizados testes utilizando como soluto PEO com massa molecular $M_{v1}=4x10^6$ g/mol e concentração c= 25 ppm, a temperatura de 27°C. Durante o teste a rotação da bomba foi controlada em cada passe, a fim de se atingir o mesmo número de Reynolds alcançado no teste com compressor para o passe correspondente, para, assim, ser possível comparar o fator de atrito e a redução de arraste entre os testes. Os resultados obtidos são representados na Figura 4.6, que também apresenta os resultados obtidos para teste com compressor utilizando o mesmo polímero à mesma concentração.



Figura 4-6 - Gráfico comparativo entre teste realizado com compressor e com bomba centrífuga.

Observa-se que o efeito da degradação da bomba é muito mais severo quando comparado com o teste em que é utilizado ar comprimido para promover o escoamento. Como a bomba está localizada antes da seção de testes, é possível observar que há uma elevada degradação logo no primeiro passe, para o qual a redução de arraste máxima obtida no teste com compressor é da ordem de 60% e teste no com a bomba de apenas 30%. Para o teste com a bomba a redução de arraste decai muito rapidamente e a partir do décimo passe se apresenta praticamente nula, estando dentro das incertezas de medição da bancada, enquanto para o teste com o compressor a degradação é mais lenta e a redução de arraste estabiliza em torno de 10%.

A degradação acelerada da solução quando submetida a escoamento pela bomba centrífuga se deve ao funcionamento e características construtivas da mesma. As longas cadeias das macromoléculas são fortemente quebradas quando a solução se choca com as palhetas do rotor da bomba centrífuga em rotação. Vale ressaltar que os resultados obtidos estão relacionados à bomba de simples estágio utilizada, os resultados poderiam ser diferentes se fosse utilizada uma bomba com mais estágios, número de palhetas ou tamanho de rotor diferentes, ou mesmo outro tipo de bomba.

A Figura 4.7, mostra a comparação entre a vazão em função da rotação da bomba para teste realizado com água filtrada e com a solução com PEO.



Figura 4-7- Gráfico da vazão em função da rotação da bomba para água e solução com PEO

Como o teste é iniciado pelas rotações mais altas a fim de alcançar os mesmos níveis de Reynolds encontrados para o compressor como mostra a Figura 4.6, é possível notar que para os primeiros passes, de rotação mais elevada, a diferença entre a vazão obtida com a solução aditivada e a água é da ordem de 15% e vai reduzindo à medida que as rotações vão se tornando mais baixas, tornando-se praticamente nulo, devido à degradação sofrida pelo polímero no decorrer dos passes. O teste mostra que, apesar da degradação sofrida, a adição do polímero foi capaz de provocar o aumento da vazão do fluido para uma mesma rotação da bomba, demonstrando que a técnica de injeção de aditivos pode ser utilizada como uma alternativa em situações onde se necessite implantar bombas mais potentes ou um maior número de bombas.

Como visto, para aplicações de engenharia não é viável a utilização de soluções poliméricas para redução de arraste a montante de bombas centrífugas uma vez que a degradação provocada pela bomba torna ineficiente o efeito do polímero. Desta forma, em construções onde são utilizadas bombas, a aplicação de solução redutora de arraste deve ser realizada a jusante da bomba, como é feito, por exemplo, no "Trans Alaska Pipeline", no qual é feita injeção de solução de elevado peso molecular em óleo a jusante de suas 12 estações de bombeamento, alcançando ganhos de até 30% no aumento da vazão.

4.5 Análise do efeito do tipo de polímero na redução de arraste

O tipo de aditivo redutor de arraste tem grande influência no efeito de redução do fator de atrito e também na degradação sofrida pela solução durante o escoamento. A fim de se analisar tal influência, são realizados testes utilizando compressor e bomba centrífuga para promover o escoamento nos quais são utilizados dois diferentes tipo de solução polimérica, uma contendo PEO e a outra PAM, ambas em concentração de 50 ppm. A Figura 4.8 evidencia os resultados obtidos.



Figura 4.8 - Gráfico comparativo entre PEO e PAM para teste com compressor e bomba.

É possível notar que para os dois primeiros passes utilizando o compressor, a redução de arraste promovida pelo PEO é maior, porém a partir do quarto passe o quadro se inverte, se tornando DR para a solução contendo PAM maior que a de PEO. No teste com a bomba o DR alcançado pelo PAM é maior que para o PEO desde o primeiro passe. Isso sugere que a

Poliacrilamida seja mais resistente à degradação do que o Óxido de Polietileno e, assim, apresente degradação mais lenta, como observado por Pereira e Soares (2012).

Nota-se que ambos sofrem degradação quando submetidos aos dois tipos de escoamento, sendo a degradação imposta pela bomba muito mais severa do que a pelo compressor, como pode ser notado já no primeiro passe. Porém o PAM tem a capacidade de resistir melhor aos efeitos do escoamento e, portanto, sua degradação é mais lenta e seu DR se torna assintótico num valor superior ao do PEO, cerca de 25% contra 11%, respectivamente, para teste com compressor. Para o teste com a bomba, nota-se que o PEO se degrada por completo, sendo a redução de arraste mantida por ele praticamente nula a partir do décimo passe, enquanto que para o PAM, DR é mantido em cerca de 5% mesmo após vinte passes.

5 Conclusão e recomendações futuras

O presente trabalho trata de uma abordagem experimental para análise da degradação polimérica em escoamentos turbulentos com redução de arraste por adição de polímeros flexíveis de alto peso molecular e tem como foco a análise da influência de fatores como massa molecular, concentração e uso de bomba centrífuga. Os testes são realizados em uma bancada experimental desenvolvida no Laboratório de Máquinas de Fluxo da Universidade Federal do Espírito Santo. Os polímeros utilizados foram o Óxido de Polietileno, PEO, de massas moleculares de 4 e 5 x 10^6 g/mol e a Poliacrilamida, PAM, de massa molecular5 x 10^6 g/mol.

O procedimento de preparação das amostras utilizadas nos testes foi seguido criteriosamente a fim de evitar que a falta de diluição ou degradação precoce da solução por agentes externos pudesse causar alterações nos resultados.

Os valores de redução de arraste máximos encontrados para os testes com o compressor são da ordem de 70% para a concentração de 100 ppm, e da ordem de 50% para concentrações mais baixas, 25 ppm. Enquanto os valores de redução de arraste mínimos encontrados após quarenta passes pela bancada são de cerca de 20% para concentrações mais altas e 5% para concentrações mais baixas. Sendo assim, é possível concluir que a redução de arraste se torna mais acentuada para concentrações mais elevadas de polímero na solução.

Já para os testes com a bomba centrífuga a redução de arraste torna-se nula após cerca de dez passes pela bancada, mostrando que o polímero utilizado, PEO, não é resistente às condições severas impostas pelo rotor da bomba. Quando comparado com o PEO, o PAM sofre degradação mais lenta, apresentando níveis de redução de arraste mínimo, após sucessivos passes pela bancada, mais elevado.

Os resultados obtidos apresentam alta concordância com os resultados teóricos para aplicações sem e com aditivos, mostrando que a montagem experimental apresenta medições e resultados confiáveis. Desta forma, a planta é capaz de auxiliar o desenvolvimento de outros estudos que avaliem a influência de outros fatores na redução de arraste. Como recomendações para trabalhos futuros se tem: realização de testes que investiguem a utilização de diferentes tipos de aditivos, poliméricos ou não; investigação da degradação de aditivos por diferentes tipos de bombas ou acidentes de linha; investigação da degradação de aditivos por efeitos da temperatura e utilização de outros fluidos como solventes, tais como álcool e biodiesel.

6 Referências

Andrade, R. M. "Análise experimental da redução de arrasto em soluções com polímeros rígidos e flexíveis em uma geometria rotativa desde os primeiros instantes do escoamento turbulento: efeitos de número de reynolds, concentração, massa molecular, temperatura e salinidade marinha". Dissertação de Mestrado – PPGEM, UFES, 2013.

Choi, H. J. Kim, C. A. Sohn, J. and Jhon, M. S. "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction," Polymer Degradation and Stability, vol. 69, pp. 341–346, 2000.

Dancor, Catálogo. Dancor - Bombas, Filtros para Piscinas e Sistemas de Pressurização. *Dancor*. www.dancor.com.br.

Dimitropoulos, C. D.; Dubief, Y.; Shaqfeh, E. S. G.; Moin, P. and Lele, S. K. "Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow," Physics of Fluids, vol. 17, pp. 1–4, 2005.

Dubief, Y.; White, C. M.; Terrapon, V. E.; Shaqfeh, E. S. G.; Moin, P. e Lele, K. "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows," J. Fluid Mech, vol. 514, pp. 271–280, 2004.

Elbing, B. R. Solomon, M. J. Perlin, M. Dowling, D. R. and Ceccio, S. L. "Flow- induced degradation of drag-reducing polymer solutions within a high-reynolds- number turbulent boundary layer," J. Fluid Mech, vol. 670, pp. 337–364, 2011.

Lumley, J. L. "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. j. polym," Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews, vol. 7, pp. 263-290, 1973.

Merrill, E. W. and Horn, A. F. "Scission of macromelecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows," Polymer Communications, vol. 25, pp. 144–146, 1984.

Min, T. Yoo, J. Y. Choi, H. and Joseph, D. D. "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow," Journal of Fluid Mechanics, vol. 486, pp. 213–238, 2004.

Motier, J.F. Chou, L. C. e Kommareddi, N. S. "Commercial drag reduction: past, present, and future," in Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, ASME, San Diego, USA, 1996.

Moussa, T. e Tiu, C. "Factors afecting polymer degradation in turbulent pipe flow," Chemical Engineering Science, vol. 49, pp. 1681–1692, 1994.

Nakken, T. Tande, M. and Nystrom, B. "Effects of molar mass, concentration and thermodynamic conditions on polymer-induced flow drag reduction". European Polymer Journal, vol. 40, pp. 181–186, 2004.

National Instruments, Catálogo. Aquisição de dados. National Instruments. www.ni.com.

Paterson, R. W. and Abernathy, F. H. "Turbulent flow drag reduction and degradation with dilute polymer solutions," J. Fluid Mech, vol. 43, pp. 689–710, 1970.

Pereira, A. S. Projeto de graduação - Projeto de bancada para análise experimental de redução de arraste em escoamentos turbulentos por injeção de aditivos – UFES - 2009.

Pereira, A. S. "Análise experimental da degradação polimérica em escoamentos turbulentos com redução de arraste em uma geometria rotativa: Efeitos de número de Reynolds, concentração, massa molecular, temperatura e diferentes polímeros," Dissertação de Mestrado – PPGEM, UFES, 2012.

Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device,"Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 179, pp. 9–22, 2012.

Pereira, A. S, Soares, E. J, Andrade, R. M. "Drag reduction induced by flexible and rigid molecules in a turbulent flow into a rotating cylindrical double gap device: Comparison between Poly (ethylene oxide), Polyacrylamide and Xanthan Gum", Jounal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, pp. 72-87, 2013.

Ptasinski, P. K. Nieuwstadt, F. T. M. van den Brule, B. H. A. A. and Hulsen, M. A. "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction," Flow, Turbulence and Combustion, vol. 66, pp. 159–182, 2001.

Sandoval, G. A. B., Silva, L. A. S., Silva, R. T., Thomaz, F., Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Drag reduction and degradation of flexible polymers in tubes". Physics of Fluids, submitted, 2014.

Savins, J. G. "Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow," Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 4, p. 203, 1964.

Schulz, Catálogo. Schulz Compressores. Schulz. www.schulz.com.br.

Silva, L. A. S. "Redução de arraste e degradação de polímeros flexíveis em escoamentos turbulentos em dutos". Dissertação de Mestrado – PPGEM, UFES. 2014.

Solomon, J. M., Vanapalli, S. A. e Islam, T. M. "Scission-induced bounds on maximum polymer drag reduction in turbulent flow," Physics of Fluids, Vol. 17, 2005.

Sreenivasan K. R. e White, C. M. "Analysis of polymer drag reduction on a flat plate," Journal of Fluid Mechanics, vol. 409, pp. 149–164, 2000.

Tabor, M. and Gennes, P. G. D. "A cascade theory of drag reduction," Europhysics Letter, vol. 7, pp. 519–522, 1986.

Toms, B. A. "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large reynolds numbers," Proceedings of the International Congress of Rheology, Holland, North-Holland, Amsterdam, Section II, pp. 135–141, 1948.

Vanapalli, S. A. Islam, T. M. and Solomon, J. M. "Universal scaling for polymer chain scission in turbulence," Physics of Fluids, vol. 17, 2005.

Virk, P S, et al. "The Toms phenomenom: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 20, pp. 22-30. 1967.

Virk, P.S. "Drag reduction by collapsed and extended polyelectrolytes," Nature, vol. 253, pp. 109-110, 1975.

Virk, P. S. "Drag reduction fundamentals," AIChE Journal, vol. 21, pp. 625–656, 1975.

Warholic, M. D. Massah, H. and Hanratty, T. J. "Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of reynolds number, concentration and mixing," Experiments in Fluids, vol. 27, pp. 461–472, 1999.

Warme, Folhas técnicas. Transmissor de pressão – Série WTP-4010. Warme. www.warme.com.br.

WEG, Catálogo. Weg – Inversores de frequência . Weg. www.weg.net.br.

White, C. M. and Mungal, M. G. "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction whit polymer additives," Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 40, pp. 235–256, 2008.

Zimm, B. H. "Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefrigence and dielectric loss," Journal of Chemical Physics, vol. 24, pp. 269–278, 1956.

7 Anexos

7.1 Anexo 1 – Especificação dos equipamentos que compõem a montagem experimental

7.1.1 Bomba:

- Fabricante: Dancor;
- Modelo: CAM-W6C tipo centrífuga;
- Rotação máxima: 3450 rpm;
- 1,5 CV de potência elétrica;
- Rotor de 145 mm;
- Tensão de alimentação de 220 V com motor trifásico.

Na Figura 2 está representada a curva característica da bomba.



Figura 7-1 - Curvas das bombas centrífugas Dancor, modelo CAM-W6C (DANCOR).

7.1.2 Inversor de frequência:

- Fabricante: Weg;
- Modelo: CFW 08;
- Faixa de potência: 0,25 a 20 CV;
- Resolução de frequência: 0.01Hz para frequências até 100.0Hz e 0.1Hz para frequências maiores que 99.99Hz;
- Quatro entradas digitais, uma entrada analógica e uma saída a relé (contato reversivo).

7.1.3 Medidor de vazão magnético:

- Fabricante: Emerson Progress Management
- Modelo: Rosemount 8732;
- Faixa de medição: 0,01 a 12 m/s;
- Condutividade mínima do fluido: 5 microsiemens/cm;
- Temperatura de operação: -50 a 74 °C;
- Damping: ajustável entre 0 e 256 s;
- Precisão: 0,5% da taxa.

7.1.4 Compressor:

- Fabricante: Shulz;
- Modelo: MSV 12/175 tipo odontológico;
- Unidade compressora de único estágio;
- Volume do reservatório de 178 L;
- Deslocamento de ar teórico de 340 L/min;
- Pressão de trabalho entre 5,5 e 8,3 bar.
- Motor de 2 x 1 HP;
- Tensão de alimentação de 220 V, monofásico

7.1.5 Vaso de pressão:

- Fabricante: Engetank;
- Capacidade volumétrica: 350 litros,
- Paredes em chapa de aço SA-36 com 4,75 mm de espessura ;

- Pressão máxima de trabalho admitida: 8,70 kgf/cm²;
- Pés tipo coluna (facilita manutenção do vaso e montagem dos acessórios);
- Meias-luvas roscadas (NPT);
- Porta oblonga de inspeção de 230x300mm;

• Dez bocais – luvas soldadas a furos – permitem a fixação de resistências térmicas, poços termométricos para acomodação de termopares, manômetro para a camada de gás e válvula de segurança, além de permitirem a entrada e saída de fluido de trabalho e ar comprimido;

- Pintura azul (referente ao ar comprimido);
- Informações sobre dimensões disponíveis no desenho técnico.

Na figura 3 é mostrado o desenho técnico do vaso de pressão apresentado pelo fabricante, onde estão especificadas todas as suas medidas e características técnicas.



Figura 7-2 - Desenho técnico do vaso de pressão, empresa Engetank.

7.1.6 Transmissores de pressão:

- Fabricante: Warme;
- Modelo: WTP 4010;
- Sensor piezoresistivo;
- Faixa de indicação: 0 a 5 bar (4 a 20 mA);
- Faixa calibrada: 0 a 5 bar (4 a 20 mA);
- Aplicação: monitoramento de pressão estática;
- Fluido: Água, água do mar;
- Faixa de Temperatura: 10-90 °C;
- Ajuste interno: Zero/Span;
- Rosca: ¹/₄" BSP;
- Fornecidos com certificado de calibração RBC Inmetro (Rede Brasileira de Calibração).

Segue dados obtidos na calibração para cada transdutor:

PT-01

- Incerteza de medição: 0,0056 mA;
- Curva de calibração: y = 4,020705 + 3,199791x

PT-02

- Incerteza de medição: 0,0057 mA;
- Curva de calibração: *y* = 4,026489 + 3,198514*x*

PT-03

- Incerteza de medição: 0,0077 mA;
- Curva de calibração: y = 4,026432 + 3,197659x

7.1.7 Placas de aquisição de dados:

• Fabricante: National Instruments;

Modelo 1: módulo de entrada analógica para termopar NI 9211 (PN 198864C-01L);

• 4 canais de 80 milivolts;

- Resolução: 24 Bits;
- Amostragem de 14 amostras/s;
- Rack com conexão USB CDAQ-9171 (PN 195724C-01L).

Modelo 2: módulo de aquisição de dados NI USB-6008 (PN 191039D-02L);

- Resolução: 12 Bits;
- Amostragem de sinais: 10.000 amostras/s;
- Cabo USB (PN 192256A-01).

7.1.8 Termopares:

- Fabricante: Iope;
- Tipo: J (ferro/cobre-níquel);
- Faixa de utilização: -40 a 750°C;
- Adequados para uso no vácuo, em atmosferas oxidantes, redutoras e inertes.
- Dois termopares no vaso de pressão, um no início e um no final da seção de teste.

7.1.9 Resistências térmicas:

- Fabricante: SMS Resistências Elétricas;
- Duas resistências tubulares de imersão;
- Três tubos de cobre de 9 mm de diâmetro cada;
- Comprimento: 50 mm;
- Potência: 7 KW;
- Alimentação: 220V, trifásica;
- Capacidade de aquecimento: 420 litros de água destilada a 50°C em uma hora;

• Possuem cabeçotes com roscas em latão de 2 polegadas, tipo NPT, acoplados a termostatos que propiciam o acionamento ou desligamento das resistências uma vez atingida a temperatura desejada.