UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FABRÍCIO THOMAZ

EFICIÊNCIA DA GOMA XANTANA NA REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS: COMPARAÇÃO COM POLÍMEROS FLEXÍVEIS

VITÓRIA 2014

FABRÍCIO THOMAZ



EFICIÊNCIA DA GOMA XANTANA NA REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS: COMPARAÇÃO COM POLÍMEROS FLEXÍVEIS

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

Orientador: Prof. Dr. Edson Jose Soares.

VITÓRIA 2014

FABRÍCIO THOMAZ

EFICIÊNCIA DA GOMA XANTANA NA REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS: COMPARAÇÃO COM POLÍMEROS FLEXÍVÊIS

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

Aprovado em: 15 de Dezembro de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Edson Jose Soares Universidade Federal do Espirito Santo Orientador

Prof. Dr. Rogério Ramos Universidade Federal do Espirito Santo

millom

Me. Anselmo Soeiro Pereira Université des Sciences et Technologies de Lilie - USTL

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, por ter me dado força e saúde para seguir meu caminho e conquistar diversos sonhos já alcançados.

Um agradecimento especial à minha família, meus pais Clementino Thomaz e Rosária Mação Thomaz, e meus irmãos, Fabiula Thomaz e Fagner Thomaz. São meu alicerce, sempre confiando em mim, me auxiliando emocionalmente e financeiramente, para que eu conseguisse concluir um de meus sonhos, graduar em uma universidade, mesmo sendo necessário ficar longe deles.

À minha namorada Nathalia, por todo amor e carinho dado. Também à meu primo Rubson e meu amigo Pedro Henrique (PH), companheiros de república que foram minha segunda família.

Agradeço ao meu professor e orientador, Edson Jose Soares, qual tenho grande admiração. Foi essencial ao desenvolvimento deste trabalho, estando sempre disposto a sanar minhas dúvidas.

Ao professor Rogério Ramos, pelo espaço disponibilizado no Laboratório de Máquinas de Fluxo e estando sempre disposto a ajudar em dificuldades encontradas.

Aos meus amigos de equipe, Gustavo, Renata e Lucas que me auxiliaram muito nos inúmeros e cansativos testes.

Agradeço o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCTI.

RESUMO

A redução de arrasto e a degradação de polímeros de alto peso molecular vêm sendo largamente estudada desde a sua descoberta, há mais de seis décadas. Sabe-se que o fenômeno age interagindo com a produção, desenvolvimento e transporte da turbulência. Atua basicamente tendendo laminarizar um escoamento turbulento, contribuindo assim para uma melhor eficiência no escoamento de líquidos. O estudo desperta muito interesse para o sistema industrial, em especial, no que diz respeito ao transporte de fluidos em dutos. Entretanto, devido à complexidade envolvida, o mecanismo de redução de arrasto ainda não é completamente entendido. Uma grande desvantagem, que se torna um grande obstáculo para o uso prático de polímeros, é sua degradação mecânica, cuja consequência é a perda de eficiência do aditivo. Investiga-se no presente trabalho a eficiência na redução de arrasto e a resistência quanto a degradação de três diferentes polímeros: Óxido de Polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Os dois primeiros são caracterizados por possuírem cadeia molecular flexível enquanto o último possui cadeia rígida. Uma bancada experimental foi utilizada, na qual o fluxo foi proporcionado por pressão imposta a partir de um compressor ou então por uma bomba centrífuga. Os principais resultados exibidos são níveis de redução de arrasto (DR) em função do número de passes (Np) da solução pela seção de teste. Em especial, o polímero de cadeia rígida (XG) foi minunciosamente analisado uma vez que tal polímero possui características peculiares em relação aos outros aditivos também estudados (PEO e PAM).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
	1.1 Motivação	7
	1.2 OBJETIVOS	9
	1.3 ESTADO DA ARTE	10
2	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	21
	2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	21
	2.2 DETALHAMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL	23
	2.3 PREPARO DAS AMOSTRAS	24
	2.4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	29
	2.5 CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO E REDUÇÃO DE ARRASTO, DR	30
	2.6 CRITÉRIO DE TRATAMENTO DE DADOS	33
3	RESULTADOS	35
	3.1 CALIBRAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	35
	3.2 RESULTADOS PRELIMINARES	39
	3.3 ANÁLISE DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO NA REDUÇÃO DE ARRASTO E DEGRADAÇÃO) DO
	POLÍMERO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSES	40
	3.4 Análise do efeito da concentração na redução de arrasto relativa, DR',	, EM
	FUNÇÃO DO NÚMERO DE PASSES	45
	3.5~Análise do escoamento proporcionado pelo compressor e pela bomba	48
	3.6 ANÁLISE DO FLUXO E DA QUEDA DE PRESSÃO ATRAVÉS DA SEÇÃO DE TESTE	50
	3.7 Análise da perda de eficiência da Goma Xantana em escoamento com	
	CIRCUITO FECHADO	53
	3.7.1 Redução de arrasto de Goma Xantana em circuito fechado: vazão	
	constante	53
	3.7.2 Redução de arrasto de XG em circuito fechado: variando a vazão	58
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5	REFERÊNCIAS	61
6	ANEXOS	66

6.1 EQUIPAMENTOS QUE COMPÕE O EXPERIMENTO E SUAS ESPECIFICAÇÕES	66
6.1.1 Bomba centrífuga	66
6.1.2 Compressor	67
6.1.3 Vaso de pressão	67
6.1.4 Medidor de vazão magnético	67
6.1.5 Transmissores de pressão	68
6.1.6 Termopares	69
6.1.7 Inversor de frequência	69
6.1.8 Placas de aquisição de dados	69
6.2 TELA PRINCIPAL DO SUPERVISÓRIO	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Mesmo após mais de seis décadas da descoberta do fenômeno de redução de arrasto pela ação de polímeros em baixa concentração, apesar do grande interesse e das muitas aplicações para tecnologia, o fenômeno ainda não é totalmente compreendido e seu mecanismo continua sendo objeto de muitos estudos. Uma melhor compreensão da redução de arrasto se torna muito útil no seu campo de aplicação, que é vasto: diminuição do custo de bombeamento em oleodutos, aumento na taxa de transferência de calor em trocadores de calor, prevenção de cavitação e erosão, etc. Fábula [1] relata a utilização de técnicas de redução de arrasto por bombeiros nova-iorquinos. Esses últimos conseguiram extinguir incêndios com mais eficiência devido ao maior alcance dos jatos d'água.

O transporte de óleo em tubulações está presente em vários processos na indústria petrolífera. A redução de arrasto se mostra muito útil nessa área, proporcionando significativa diminuição no custo de bombeamento, prevenção de cavitação e ruídos em turbobombas. No que tange à indústria petrolífera, a técnica de redução de arrasto é particularmente interessante pois permite transportar maior quantidade de óleo para um mesmo aporte energético. Em termos práticos, com o uso dessa técnica é possível obter maior produção, melhor consumo de energia ou até mesmo redução do diâmetro das tubulações.

Um exemplo de aplicação de redução de arrasto que pode ser citado diz respeito à Trans-Alaska Pipeline, um oleoduto com 1287 km de extensão, 48 polegadas de diâmetro e com 12 unidades de bombeamento transportando oléo cru de Prudhoe Bay à Valdez, Alaska. É aplicada após cada estação de bombeamento, uma certa quantidade, na ordem de partes por milhão (ppm), de solução polimérica de alto peso molecular, e como resultado, sendo alcançado redução no fator de atrito na ordem de 30 a 40%, contribuindo bastante para a redução nos custos do transporte do óleo.

Outra aplicação interessante na indústria do petróleo, está ligado ao pico de produção no processo de recuperação de um poço. Normalmente, o processo produtivo de um poço em função da sua vida útil segue um comportamento semelhante ao mostrado na Figura 1. Devido às altas pressões no início da extração, o volume recuperado diariamente é alto. No entanto, a pressão no reservatório cai a medida que fluido é retirado, e assim a produção diária diminui com o tempo. A aplicação da técnica de redução de arrasto nesses casos se mostra muito atrativa. A instalação de equipamentos de grande porte e tubulações de grande diâmetro no mar é uma tarefa complexa que exige embarcações especiais e condições de mar adequadas, tornando a operação complexa. Sugere-se projetar tubulações de acordo com vazões mais baixas, inferiores às de pico, lançando-se mão dos mecanismos de redução de arrasto quando a produção está no seu estado de maiores fluxos, e assim as vazões superiores podendo ser transportadas em tubos projetados para vazões menores. Reduzindo o diâmetro ou números de tubos há grande diminuição dos custos com material e instalação de equipamentos. Bernardo e Andreolli [2] citam esta aplicação em seu trabalho, onde uma produção um pouco superior ao previsto, devido ao comportamento melhor dos poços, houve necessidade de aumentar a capacidade do sistema de exportação do oleoduto existente, sendo utilizado técnicas de redução de arrasto. Nesse cenário, buscando um ganho de produção, foi utilizado com sucesso um tipo de redutor de fricção com resultados bem satisfatórios nesse sistema. A redução em termos de perda de carga foi de aproximadamente 40% com dosagem por volta de 80 ppm.



Figura 1. Vazão de óleo durante a vida útil de extração em um poço.

Uma outra aplicação para o fenômeno, não menos importante, é o emprego na área biomédica (escoamentos vasculares). A partir da utilização de aditivos poliméricos pode-se obter uma redução na pressão arterial, prevenindo possíveis problemas causados pela má circulação do sangue. Comparado ao escoamento em duto, para o qual fenômeno já é muito complexo devido à característica diluída das soluções interagindo com a turbulência, quando aplicado a escoamento vascular, o problema torna-se ainda mais complexo devido a um escoamento transitório, pulsátil, de seção transversal com possíveis variações e interações com tecidos e células que se encontram na vizinhança do escoamento. Greene et al. [3] simulou escoamento pulsátil em um tubo de vidro com 3,325 mm de diâmetro utilizando como fluido sangue de bezerro. Adicionou ao sangue 40 ppm de Poliacrilamida obtendo redução de arrasto em torno de 30%. Acredita-se que o primeiro a estudar a redução de arrasto em escoamentos vasculares, foi Mostardi et al. [4], em 1976, que observou uma diminuição nas perturbações do escoamento na artéria aorta de cães, quando injetado Separan AP-30 (um tipo de poliacrilamida). Bessa et al. [5] realizou experimentos em uma bancada onde se reproduzia escoamentos pulsáteis, e em paralelo realizava experimentos de injeção de aditivo redutor de arrasto (PEG 4000) em artérias caudais de ratos. Estes obtiveram resultados positivos em ambos os testes, ressaltando como uma das principais descobertas o fato de o efeito do PEG 4000 na redução de arrasto ser amplificado na presença de células endoteliais, segundo os pesquisadores tais células são redutoras de arrasto, resultado nunca antes reportado.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é avaliar de forma experimental a perda de eficiência na redução de arrasto proporcionada por soluções diluídas do polímero de moléculas rígidas Goma Xantana, em escoamentos turbulentos em dutos. Para efeito comparativo, os resultados foram confrontados com os obtidos com moléculas flexíveis. Além de despertar interesse na indústria do petróleo, a XG também é aplicada nas áreas de biomédicas. Para tais análises, foi utilizada uma bancada experimental na qual o fluxo pode ser proporcionado por ar comprimido proveniente de um compressor, ou por uma bomba centrífuga. A principal diferença entre os dois tipos de escoamentos são os intensos e localizados níveis de turbulência impostos no

fluido quando este passa pelo rotor centrífugo da bomba. A partir disso, pode-se avaliar a resistência do polímero, investigando a influência de diferentes níveis de turbulência na sua perda de eficiência. Os experimentos podem ser operados em circuito aberto (utilizando compressor ou bomba) ou fechado (utilizando bomba). O coeficiente de redução de arrasto em função do tempo (circuito fechado) ou do número de passes pela bancada (circuito aberto) é avaliado. Também é feita uma análise dos efeitos de diversas concentrações de aditivos.

1.3 Estado da arte

Nos últimos anos aumentou muito o interesse em técnicas de redução do fator de atrito em escoamentos, o que se deve principalmente à possibilidade de economia de energia. Relatos sobre redução de arrasto devido à adição de partículas solúveis de alto peso molecular datam de 1906, quando o comportamento anômalo do escoamento de pasta de papel foi observado. Porém, em 1883 já se observara em testes com bombas hidráulicas flutuações na vazão em cerca de 10%, sendo futuramente atribuída à presença de substâncias poliméricas produzidas por algas. Apenas em 1948 a demonstração sistemática do fenômeno foi reportada, o químico britânico B. A. Toms [6] mostrou que uma solução diluída em quantidades de partes por milhão (ppm) de poli(metil metacrilato), um polímero de alto peso molecular, em solvente monoclorobenzeno elevou consideravelmente a vazão, mantendo-se fixo o gradiente de pressão ao longo da tubulação, atribuindo isto a uma menor resistência ao escoamento, em regime turbulento, quando comparado ao solvente puro. O fenômeno se tornou tão importante que até hoje é conhecido por "Efeito Toms". Desde a descoberta de Toms, a aplicação do fenômeno de redução de arrasto tem se ampliado bastante, sendo inúmeros trabalhos direcionados a entender esse fenômeno. Ele depende significativamente da massa molecular e flexibilidade da cadeia polimérica, concentração de macromoléculas e do nível de turbulência. Dois resultados fornecem evidências para acreditar que a redução de arrasto ocorre devido às interações entre polímero e turbulência: o primeiro é que não se observa diferenças significativas no fator de atrito em soluções diluídas de polímero em fluxo laminar, quando comparado com o solvente sozinho. O segundo é que, fixando-se o diâmetro do tubo e o número de Reynolds, o início da redução de arrasto depende do número

de monômeros da macromolécula. A combinação de turbulência e do caráter altamente diluído das soluções poliméricas torna o tratamento do fenômeno bastante complexo. De forma geral, as teorias indicam que as moléculas poliméricas interferem na produção, desenvolvimento ou no transporte de turbulência. Muito dos modelos sugerem que a redução de arrasto está intimamente ligada ao tamanho das macromoléculas e à sua capacidade de esticar (flexibilidade). Uma molécula polimérica é constituída por uma cadeia de monômeros que se ligam quimicamente, logo, o tamanho da molécula será definido pelas características e números de monômeros presentes, sendo que quanto maior for essa cadeia maior será a capacidade de redução no fator de atrito proporcionado pelo aditivo. A Figura 2 ilustra a estrutura base do polímero óxido de polietileno (PEO), que é composto por N monômeros de comprimento a. A distância entre o primeiro e o último monômero é definido pelo vetor q.



Figura 2. Estrutura básica de uma molécula de PEO (White e Mungal [7]).

As teorias com relação ao mecanismo de redução de arrasto se dividem em duas classes baseadas no estiramento da molécula polimérica no escoamento. A primeira, proposta por Lumley [8] é baseada nos efeitos viscosos, e a segunda, proposta por Tabor e De Gennes [9] é fundamentada nos efeitos elásticos das moléculas.

Lumley [8] começa primeiramente definindo a redução de arrasto como a redução da tensão de cisalhamento na parede (τ_w) e, consequentemente, no fator de atrito da solução polimérica, a valores inferiores a tensão de cisalhamento do solvente. Sua teoria viscosa propõe que, inicialmente as macromoléculas são esticadas na região

do escoamento conhecida com subcamada de transição, onde turbulência e tensões viscosas são intensas. Os vórtices nessa região esticam as macromoléculas aumentando a viscosidade extensional da solução. Acredita-se que esse aumento da viscosidade suprime flutuações turbulentas (as que dissipam energia), deslocando a subcamada de transição em direção ao centro do tubo e, consequentemente, diminuindo o atrito. Ocorre uma espécie de tendência de laminarização do escoamento.

A segunda teoria, baseada nos efeitos elásticos da molécula, bastante aceita atualmente, proposta por M. Tabor e Pierre G. De Gennes em 1986 [9], foi designada Teoria Elástica para redução de atrito. Os autores propõe que a energia armazenada pelo polímero parcialmente esticado é uma variável muito importante e que o aumento da viscosidade efetiva (Lumley [8]) é insignificante. Eles partiram da teoria geral da turbulência desenvolvida por Kolmogorov, este modelo, quando o fluido é submetido a um regime de escoamento turbulento. No escoamento, os vórtices grandes podem se transformar em vórtices menores e estes em ainda menores. Os grandes vórtices transportam fluido sem perda de energia (como ocorre em ondas no mar), porém os vórtices pequenos dissipam energia do escoamento pois apresentam tamanho onde processos de difusão das moléculas do solvente se tornam importantes. Assim, quando um fluido escoa em regime turbulento, desenvolve-se um processo em forma de cascata, em que vórtices grandes se transformam em vários vórtices pequenos. Essa transformação é conhecida como cascata de energia de Komolgorov. A teoria elástica de De Gennes relaciona a frequência de formação dos vórtices com a frequência com que as macromoléculas estiram e contraem no escoamento (relaxação polimérica). De acordo com o modelo, as cadeias poliméricas se comportam como molas hookeanas, sendo que o escoamento causa sua deformação e alinhamento com o fluxo. A energia absorvida pelos polímeros é posteriormente devolvida ao escoamento médio. Esse movimento coordenado das submoléculas produzem uma eficiência maior no transporte de movimento em um escoamento, contribuindo para a diminuição da perda de carga.

O modelo elástico se relaciona com o tempo de relaxação de uma molécula, τ_z , onde τ_z representa o tempo médio necessário para que uma macromolécula retorne do estado esticado para o estado enovelado, podendo ser determinado, assim como proposto por Zimm [10], de acordo com a Equação (1).

$$\tau_z = \frac{M\eta_s(\eta_{sp}/c)}{0.586RT} \tag{1}$$

Onde η_s é a viscosidade do solvente, M massa molecular do polímero, R e T a constante universal dos gases e temperatura absoluta, o termo η_{sp}/c é função crescente da concentração, calculado experimentalmente.

A Figura 3 ilustra o processo de estiramento e relaxação de uma macromolécula polimérica flexível, quando essa está submetida à tensões.



Figura 3. Estiramento e relaxação de polímeros (White e Mungal [7]).

A teoria elástica propõe que para flutuações de baixa frequência (correspondente a grandes vórtices), menor que $1/r_z$, não ocorre influência do polímero no fluxo. No entanto, a partir de um certo ponto, devido à transformação de vórtices maiores em menores (logo um aumento da frequência) a frequência de relaxação do polímero se torna menor que a frequência de formação dos vórtices, a partir deste ponto a redução no fator de atrito é iniciada. Consequentemente ocorrerá um truncamento da cascata de Kolmogorov. Para polímeros de cadeia rígida, a teoria elástica considera que este se encontra totalmente estendido ao longo do escoamento, sendo algum grau de redução de arrasto atribuído devido apenas à orientação das partículas no escoamento. Sellin et al. [11] reportam que o mecanismo da redução de arrasto atua na região próxima à parede e mais precisamente na camada de transição. Segundo esses autores os polímeros exercem influência sobre o balanço de energia, entre a produção e a dissipação turbulenta, e atribuíram isso às propriedades elásticas das moléculas. Com isso relacionaram a capacidade redutora de arrasto de um polímero

qualquer com a sua capacidade de armazenar energia por estiramento (teoria elástica [9]).

Os dois cenários, elástico e viscoso, se mostram fundamentalmente diferentes, mas ambos têm grande mérito quando comparados a dados experimentais, sendo de grande importância para o início da compreensão do mecanismo de um fenômeno de tamanha complexidade.

É sabido que a redução de arrasto é observada mais significativamente em escoamentos turbulentos, pois é necessário haver vórtices para que esse possam ser suprimidos. Porém um aspecto importante é que o vórtice deve ser capaz de esticar a macromolécula polimérica, sendo assim, existe um nível de turbulência mínimo para que seja observado o início da redução de arrasto. O número de Reynolds em que se observa o início da supressão de vórtices é chamado de Reynolds crítico, e esse ponto de início conhecido como onset, o que é altamente dependente das características da macromolécula. Hershey e Zakin [12] estudaram escoamentos turbulentos em dutos, com diversos tipos de polímeros diluídos em variados solventes. Eles propuseram uma teoria que prediz o número de Reynolds crítico para que se observe o início da redução de arrasto. Sua teoria relata que o fenômeno ocorre quando τ_z é igual ou superior ao tempo característico do escoamento, definido como a razão entre a viscosidade cisalhante e tensão cisalhante na parede do tubo (μ/τ_w). O número de Weissenberg local (W_{e_w}) é definido como a razão entre o tempo de relaxação e o tempo característico do escoamento. Logo a redução de arrasto é observada a partir do momento em que W_{e_w} assume valor unitário. Porém deve-se tomar cuidado quando utilizar esse critério, a teoria de Zimm's possui limitações, ela só é aplicada em soluções diluídas de polímeros não iônicos em solventes não polares. Gyr e Bewersdorff [13] em suas pesquisas concluíram que o número de Reynolds crítico está intimamente ligado à concentração do polímero, e não apenas às suas características. Em estudos mais recentes, Yang e Ding [14] definem o onset sendo quando $(\bar{V} - \bar{V}_0)/\bar{V}_0 \ge 4\%$, onde \bar{V} é a velocidade média da solução e \bar{V}_0 do solvente sozinho, a partir disso propõem uma equação onde pode-se determinar o número de Reynolds onde se observa o início da redução de arrasto (Re_c) sendo $Re_c = \frac{0.1}{\alpha_*}$, onde α_* é um fator elástico dependente do peso molecular, da concentração e viscosidade intrínseca do polímero (para maiores detalhes, veja [14]).

Um aspecto muito importante do fenômeno, observado por Virk em 1975 [15], é a máxima eficiência que se pode obter na redução de arrasto. Através de estudos experimentais com escoamentos turbulentos em dutos, utilizando soluções com vários polímeros, Virk observou que, fixando Re, a adição de quantidades de polímero vai aumentando a redução de arrasto. Porém essa redução chega a um valor máximo de eficiência cujo qualquer incremento na concentração, não mais influenciará na redução do fator de atrito, sendo considerada solução saturada. O mesmo efeito é observado quando se aumenta a massa molecular. De forma análoga, fixando-se agora a concentração, c, e aumentando o número de Reynolds, a partir do ponto que se se inicia a redução de arrasto (onset), a redução no fator de atrito aumenta em uma trajetória diferente da observada quando se fixa o Re e aumenta a concentração, tendendo também essa curva margear a assíntota de máxima redução de arrasto (MDR). Os valores MDR são conhecidos como Lei de Virk. A representação, o comportamento e as curvas que delimitam o valor do fator de atrito é ilustrado na Figura 4. A interpretação da assíntota de Virk divide opiniões entre as teorias viscosa e elástica. O próprio autor defende a teoria viscosa, sugerindo que MDR ocorre devido ao efeito polímero já estar presente em todas as escalas do escoamento, sendo assim, nenhum incremento de aditivo causará aumento em DR. Autores como Warholic et al. [16], e Min et al. [17], defendem a teoria elástica como explicação do fenômeno, sugerindo que quando a solução se encontra saturada, os tensores de Reynolds já foram fortemente diminuídos sendo a turbulência sustentada apenas pelas flutuações das tensões poliméricas. Chemlou [18] utilizou técnica LDV (Laser Doppler Velocimetry) para analisar o efeito do polímero na redução de arrasto em escoamento turbulento em duto. Observou que a tensão cisalhante turbulenta (tensão de Reynolds) é fortemente diminuída para altas concentrações de aditivo (próximas à MDR), porém diferentes de zero. Essa tensão restante atribuiu à contribuições do polímero, assumindo esse o papel da turbulência. Em resumo, Chemlou [18] atribui o resquício de tensões de Reynolds em altas concentrações devido as produções de turbulência pelas tensões dos polímeros (efeito elástico).



Figura 4. Ilustração dos contornos que delimitam a redução de arrasto por adição de polímeros.

Yang e Ding [14] fizeram uma série de análises matemáticas sobre redução de arrasto, derivando uma função que representa a concentração necessária para se chegar a MDR (c_m). A relação proposta foi $c_m = \frac{\rho_f}{25500\alpha_o^{0.7}}$, onde ρ_f é a desidade do fluido e α_o um parâmetro que depende das características do polímero. A relação mostra que a concentração de MDR independe do diâmetro do tubo e da velocidade do fluido, dependendo apenas do parâmetro α_o , que representa as características do aditivo. Sendo assim, diferentes polímeros terão diferentes concentrações c_m . Os autores compararam valores de c_m obtidos pela equação com os reportado por Virk [15], encontrando aceitável concordância.

Uma teoria bastante interessante, que sucede a de Tabor e De Gennes [9] é proposta por Dubief et al. [19]. Segundo os autores, as macromoléculas localizadas próximas às fronteiras do escoamento são puxadas até a subcamada de transição devido à flutuações turbulentas, sendo na subcamada de transição esticadas devidos às tensões impostas pelos vórtices. Posteriormente, as mesmas flutuações devolvem as macromoléculas às proximidades das fronteiras, onde estas tornam a encolher. Ocorre neste caso um ciclo, onde quando os polímeros esticam na subcamada de transição, estes extraem energia dos vórtices, sendo essa energia liberada quando o polímero encolhe próximo à fronteira, na subcamada viscosa. Este ciclo de estica e encolhe, em que se absorve e se devolve energia ao escoamento, sustenta o fenômeno de redução de arrasto.

Um outro aspecto sobre o fenômeno, não menos importante, diz respeito à degradação polimérica. Os próprios vórtices que são suprimidos pelas macromoléculas também são responsáveis por sua degradação. É um mecanismo muito complexo, pois envolve áreas complicadas da ciência como a química, mecânica dos fluidos não Newtonianos e turbulência. Horn e Merrill [20] estudaram a degradação em escoamentos turbulentos em dutos, concluído que as cisões ocorrem preferencialmente próximo ao ponto médio das macromoléculas. Atribuíram esse efeito devido à característica de que as maiores tensões são localizadas no centro da molécula, sendo assim, a cada cisão, a macromolécula tem sua massa molecular reduzida pela metade. A Figura 5 exibe uma ilustração geral do que ocorre numa molécula quando está submetida às tensões e deformações. Figura 5 (A) mostra o estiramento (q) que uma molécula sofre quando tensões geradas por vórtices estão presentes, enquanto que Figura 5 (B) ilustra a máxima deformação que a molécula suporta (q_{max}) e consequentemente sua ruptura em uma ligação entre monômeros próximo ao centro da estrutura. Benzi et al. [21] reporta que PEO em equilíbrio com a água está em estado enrolado, tendo um tamanho final-final da molécula (q) em torno de 10⁻⁷ m, e quando esta mesma molécula está totalmente esticada, seu máximo valor de tamanho $(q_{máx})$ é na ordem de 5x10⁻⁶ m, cerca de 50 vezes maior.



Figura 5. Estiramento e degradação de uma macromolécula polimérica devido à tensões do escoamento.

A expressão do tempo de relaxação polimérica (Equação 1) leva em consideração a massa molecular, logo, o número de monômeros (*N*), mostrando que esse é um importante parâmetro para determinar a eficiência de um polímero quanto à capacidade em reduzir arrasto. Outras propriedades importantes da estrutura da macromolécula são flexibilidade, solubilidade e viscoelasticidade (Lumley [8]). Geralmente, experimentos mostram que para uma macromolécula ser capaz de reduzir arrasto ela necessita ter uma distribuição típica de monômeros *N* > 10⁵ e τ_z > 10⁻³ s. A degradação do polímero corresponde a reduzir valores de *N*, tendo como consequência a perda dos efeitos em redução do fator de atrito.

Vanapalli et al. [22] estudaram a redução de arrasto experimentalmente em escoamentos turbulentos em dutos, com soluções diluídas de PEO e PAM. Utilizaram técnicas de cromatografia de permeação em gel (GPC) para analisar a degradação monitorando a variação da massa molecular da solução à medida que essa era submetida às cisões provocadas pela turbulência do escoamento. Observaram que a massa molecular diminui com a degradação e tende a um valor constante onde, a partir desse instante, o coeficiente de redução de arrasto também se torna constante

sendo nenhuma degradação adicional observada. Autores como Elbing et al. [23] e Pereira et al. [24] argumentam que nem todas moléculas estão submetidas a esforços ao mesmo tempo e que nem todos os esforços são os mesmos a cada momento, sendo assim, para que todas as moléculas tenham sofrido relativa degradação, um certo tempo é necessário.

Com a desvantagem da perda de eficiência, devido às cisões das macromoléculas, se fez necessário o estudo de aditivos que tivessem maior resistência à degradação. Exemplos deles são surfactantes e polímeros de moléculas rígidas, como a Goma Xantana. XG tem um interesse particular em alimentos, área farmacêutica, cosméticos e processos de fratura de poços de petróleo, onde é largamente utilizado em meio à lama de perfuração. Sua estrutura molecular principal é uma cadeia similar a de celulose. Estudos mostram que a molécula de XG é altamente dependente de temperatura e salinidade. Em condições normais, a estrutura da molécula tem forma helicoidal organizada, sendo que quando forças iônicas e temperatura são elevadas a estrutura helicoidal tende a se contrair e enrolar, o que não é viável em aplicações de redução de arrasto. Comparado às moléculas flexíveis, o mecanismo de redução de arrasto utilizando XG se mostra consideravelmente diferente. O aumento da redução de arrasto devido ao aumento do número de Reynolds, assim como proposto por Virk [15], não é muito evidente para soluções utilizando aditivo de molécula rígida XG. Pereira et al. [25] e Jaafar et al. [26] mostram que, em coordenadas Prandtl-von Kármán, após o onset, as curvas para XG são paralelas para diferentes concentrações, sugerindo que a redução de arrasto pouco depende do número de Reynolds. Benzi et al. [21] reportam que a máxima redução de arrasto (MDR) para polímeros rígidos é apenas dependente da concentração (considera insignificante a influência de Re), enquanto que para flexíveis MDR é função de c, Re e De (número de Debora). Devido ao fato de as moléculas serem rígidas e já se encontrarem esticadas, um incremento no nível de turbulência pode não provocar mudanças significativas na conformação molecular, e consequentemente no nível de redução de arrasto. Virk et al. [27] divide em dois tipos diferentes de mecanismos: Tipo A e Tipo B. O primeiro tipo relaciona polímeros que se encontram enrolados quando em repouso. Uma certa quantidade de força turbulenta é necessária para que o polímero estique e inicie redução de arrasto. Já o segundo tipo, relaciona polímeros que em repouso já se encontram esticados. Polímeros de moléculas rígidas, com a Goma Xantana, são classificados como Tipo B. Devido a molécula já estar inicialmente esticada, é esperado que o início da redução de arrasto aconteça a menores níveis de turbulência. Pereira et al. [25] e Jaafar et al. [26] reportam resultados experimentais em que o onset de moléculas rígidas é muito menor quando comparado às moléculas flexíveis. Acredita-se que as moléculas rígidas têm o mesmo tamanho em diferentes número de Reynolds. Benzi et al. [21] relatam que polímeros flexíveis sofrem uma transição de enrolamento-estiramento a partir de um certo Re, enquanto que polímeros rígidos não, pois estes não sofrerem alongamento, logo, possuem o mesmo tamanho de extensão linear, independente das tensões. O autor propõe que as macromoléculas rígidas são menos efetivas na redução de arrasto justamente por essa característica, incapacidade de esticar.

É fato que o mecanismo de redução de arrasto em moléculas rígidas apresenta uma dinâmica bem diferente dos flexíveis. Nos últimos anos muitos trabalhos se dedicaram ao estudo de redução de arrasto por adição de polímeros, porém uma minoria voltada aos rígidos. Não existe ainda um teoria consistente que explique detalhadamente o mecanismo em moléculas flexíveis, tampouco para as rígidas. Limitados estudos na literatura reportam que esses polímeros são capazes de reduzir arrasto, porém em menores níveis que os flexíveis. Apesar de uma menor eficiência, os polímeros rígidos têm vantagem sobre os flexíveis por serem mais resistentes. Uma outra vantagem é que geralmente são biopolímeros, derivados de fermentações biológicas, logo, são relativamente baratos e não tóxicos.

2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

2.1 Descrição do problema

Grande parte dos trabalhos disponíveis na literatura que abordam a pesquisa de redução de arrasto experimentalmente utilizam bancadas com escoamentos em dutos (veja [28], [22], [29], [30], [31], [26] e [6]). Porém, dados sobre os equipamentos e metodologias utilizadas não são expostos de maneira clara. Devido ao avanço da tecnologia, trabalhos recentes tem utilizado geometrias rotativas em suas análises, onde são possíveis menores instalações laboratoriais, menores volumes de amostras, além da redução no tempo para realização dos testes. Porém, experimentos em escoamentos em dutos tem a vantagem de representar uma análise mais fiel à prática. Um desenho esquemático dos componentes da bancada utilizada no presente estudo é apresentado na Figura 6. Basicamente, o aparato experimental é composto por um compressor, um vaso de pressão, uma bomba centrífuga, tubulações, um reservatório, um medidor de vazão e 3 transdutores de pressão estáticos, além de termopares e manômetros.



Figura 6. Croqui da bancada experimental.

Todos experimentos sobre redução de arrasto e degradação dos polímeros foram realizados na bancada descrita acima localizada no Laboratório de Máquinas de Fluxo e os parâmetros reológicos analisados foram obtidos no Laboratório de Reologia onde há equipamentos como Reômetro, viscosímetros e picnômetros. Ambos os laboratórios pertencentes ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFES. Tal

bancada foi projetada por Anselmo S. P. em seu projeto de graduação (veja [32]) e posteriormente feita algumas implementações.

O escoamento pode ser obtido através de ar comprimido no vaso de pressão pelo compressor, ou então utilizando uma bomba centrífuga. A redução de arrasto e a degradação polimérica é analisada em função do número de passes (Np), onde um passe é definido como a passagem completa do fluido, presente no vaso de pressão, pela tubulação de teste e por conseguinte sendo depositada no reservatório. O número de passes pode ser interpretado como a distância escoada pelo fluido no duto.

O polímero pode ser adicionado ao fluxo de fluido por 2 métodos básicos mais comuns. No primeiro, o polímero pode ser dissolvido no fluido e deixado misturar naturalmente por difusão, ou uma agitação externa pode ser aplicada para acelerar o processo de mistura, sendo bombeado apenas quando a mistura estiver homogênea. No segundo método, uma solução concentrada de aditivo pode ser injetada no centro ou na parede do tubo, onde irá se dispersar completamente devido à difusão turbulenta do escoamento, assim, a partir de uma certa distância de injeção a solução se tornará totalmente homogênea. A primeira técnica é conhecida como redução de arrasto homogênea (Figura 7 A) e a segunda heterogênea (Figura 7 B).



Figura 7. Representação esquemática dos métodos de utilização de polímero em redução de arrasto: (A) homogêneo, (B) heterogêneo. (Adaptado de Liberatore et al. *[33]*).

Alguns autores relatam que na redução de arrasto heterogênea se obtêm efeitos melhores do que em experimentos realizados utilizando uma solução homogênea prémisturada (veja [31] e [33]). Os autores concluem que existe uma interação diferente entre o polímero e a turbulência para cada técnica. Quando a solução polimérica é injetada em um fluxo já escoando, a solução é introduzida logo após a estação de bombeamento, com isso evita-se possíveis degradações impostas pela bomba. Porém, devido às altas pressões na jusante da bomba e devido ao fluxo de solução polimérica a injetar necessitar ser bem controlado, o técnica de redução de arrasto heterogênea se torna bastante complexa. A técnica utilizada no presente trabalho é a de redução de arrasto homogênea.

Os polímeros utilizados são Óxido de Polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Foi investigado o efeito da concentração, tipo de polímero e influência da degradação sofrida com escoamento proporcionado pela bomba centrífuga ou pelo ar comprido.

2.2 Detalhamento da bancada experimental

Como já mencionado, o escoamento pode ser obtido utilizando uma bomba centrífuga ou ar comprimido no vaso de pressão, sendo com a bomba possível controle da vazão e ainda o escoamento podendo ser operado em sistema aberto ou fechado (resultados analisados em função do número de passes ou tempo de escoamento, respectivamente). A tubulação é constituída por trechos de tubo de aço galvanizado com 16,35 mm de diâmetro interligados por meio de flanges e isolados termicamente, sendo que para a região onde estão instalados os transdutores de pressão, um trecho de 1400 mm de tubo é de aço inoxidável e realizado internamente usinagem de brunimento. Todo esse cuidado se deve à necessidade de uma boa qualidade da superfície interna do tubo nas regiões de tomadas de pressão além da retífica (brunimento) garantir um diâmetro conhecido e constante. Uma importância também foi dada às tomadas de pressão, de forma que seus furos não ultrapassem 2 mm de diâmetro, assim como recomendado por normas. Esse trecho de tubo foi projetado, montado e fornecido pelo Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes da Faculdade do Centro Leste. O comprimento de trecho reto de tubulação da montante até as tomadas de pressão é suficiente para garantir um escoamento desenvolvido.

O medidor de vazão escolhido foi do tipo magnético modelo Rosemount 8732 fabricado pela Emerson Progress. Tal seleção de medidor foi devido à sua característica não-intrusiva, sendo assim não causando perda de carga e nem perturbações no escoamento, o que poderia acarretar numa degradação do aditivo, e além do modelo apresentar uma excelente qualidade na leitura do fluxo, com apenas 0,5% de incerteza. Os transdutores de pressão foram fornecidos pelo fabricante Warme, com certificados de calibração indicando incertezas na ordem de apenas 0,01%.

Todos os dados necessários são controlados e aquisitados por meio de um supervisório desenvolvido sob plataforma LabVIEW. Os sinais de pressão e vazão são obtidos a partir de uma placa de aquisição de dados NI-6008. Sinais de temperatura também são monitorados a partir de termopares distribuídos ao logo da linha de teste, sendo adquiridos a partir de um módulo de entrada analógica para termopar NI-9211. O fabricante de ambas as placas de aquisição é a National Instruments. Para o controle da vazão, quando utilizada a bomba centrífuga, um componente importante que também compõe a bancada é o inversor de freqüência, modelo CFW 08 fabricado pela Weg. Este dispositivo permite, variando a freqüência, ter um controle da rotação da bomba e conseqüentemente da vazão. Assim, através de um controle PI implementado no supervisório, tem-se um controle consideravelmente preciso da vazão.

2.3 Preparo das amostras

Conforme já citado, os polímeros utilizados são PEO, PAM e XG cujas massas moleculares são, respectivamente, $M_{v1} = 4x10^6$ g/mol, $M_{v2} = 5x10^6$ g/mol e $M_{v3} = 2x10^6$ g/mol. Os mesmos polímeros foram utilizados por Pereira e Soares (2012) e a massa molecular foi verificada a partir do método de Flory [34], cujo valor foi o mesmo do afirmado pelo fabricante, Sigma-Aldrich.

Quanto as características de cada polímero, vale a pena ressaltar que o PEO é um polímero sintético de cadeia linear e flexível, solúvel em água e ampla variedade de outros solventes orgânicos. Muito utilizado em aplicações de redução de arrasto devido sua alta eficiência. É fabricado a partir da polimerização do óxido e etileno. A

unidade estrutural do PEO é de acordo com a Figura 8 (A), onde *N* indica o grau de polimerização (número de monômeros) da molécula.

PAM também é um polímero sintético de cadeia linear flexível, solúvel em água, e assim como PEO, largamente utilizado devido à grande eficiência na redução do fator de atrito. É sintetizado a partir da polimerização da acrilamida, classificado pela Agência Nacional de Pesquisa em Câncer (IARC) como substância com potencial cancerígeno. Na Figura 8 (B) uma representação de sua fórmula estrutural é exibida.

XG é um biopolímero de cadeira rígida e não linear (completamente diferente de PEO e PAM), solúvel em água, não tóxico, biodegradável, obtido a partir da fermentação por bactérias do tipo "Xanthomonas campestris". Apresenta um comportamento pseudoplástico em concentrações relativamente baixas devido ao alto valor da viscosidade causado por emaranhados unidos por pontes de hidrogênio. É de grande aplicação na indústria alimentícia, farmacêutica, cosmética e petrolífera, onde é largamente aplicado na redução de arrasto em processos de perfuração e fratura de poços. Sua fórmula estrutural é apresentada na Figura 8 (C).



Figura 8. Estruturas moleculares dos polímeros utilizados: (A) PEO, (B) PAM, (C) XG.

A Figura 8 ilustra a estrutura base de cada polímero representando apenas um monômero da macromolécula, *N* indica o grau de polimerização, ou seja, o número de monômeros.

A solução polimérica é obtida a partir da diluição direta do polímero em 150 kg de água filtrada para cada teste, com suas respectivas concentrações. Para a filtração da água, foram utilizados três filtros em série com porosidades gradualmente reduzidas de um para o outro, respectivamente 20, 10, e 5 micras, sendo o último filtro composto de um refil de carvão ativado o qual garante uma eliminação de 95% do cloro presente na água. Outros autores também utilizaram água sem cloro ou então deionizada (veja [28] e [22]), pois é sabido que cloro contribui parra degradação do polímero, Petrie et al. [35] reporta esse resultado. O polímero é pesado em uma balança analítica com 0,001 g de precisão e dividido em três partes iguais que são posteriormente depositados sutilmente em três frascos de 50 kg cada, que são então lacrados e permanecem em local com temperatura controlada a 25 °C para que possíveis efeitos de variações da temperatura ou agentes externos sejam minimizados. Os frascos com 50 kg são pesados em uma outra balança analítica, cuja precisão é de 10 g.

Após a solução estar pronta, testes foram realizados com o intuito de analisar o tempo para a total diluição por difusão do polímero. Para tal verificação, uma amostra de solução de PEO 100 ppm foi retirada dos frascos com 48, 72 e 120 horas após o aditivo ter sido adicionado. A amostra foi submetida a teste no reômetro, HAAKE MARS II, onde a viscosidade foi analisada quando imposta uma rotação com aceleração constante de 0 a 1200 rpm em dez minutos. Os resultados podem ser vistos na Figura 9 a seguir, onde a viscosidade cisalhante é apresentada em função da velocidade de rotação do rotor.



Figura 9. Teste diluição do polímero.

A partir do resultado, pode-se observar que a solução polimérica está completamente difundida após um tempo de 48 horas devido a ser observado comportamento constante a partir desse tempo de diluição. Para efeito de segurança, foi escolhido o tempo de 72 horas de diluição para todos os testes no presente trabalho.

Com o intuito de analisar o efeito que o ambiente externo pode provocar na solução, foi proposto um teste em que, numa ocasião a solução polimérica permanece no recipiente lacrado e a temperatura controlada de 25°C, em outra ocasião a solução é armazenada aberta num ambiente sem temperatura controlada. Figura 10 exibe o resultado encontrado.



Figura 10. Teste integridade da amostra.

O resultado indica a importância do ambiente controlado durante a diluição da amostra. Com a amostra aberta e sem controle de temperatura, os efeitos do polímero no escoamento são minimizados devido a possíveis efeitos ocorridos durante a variação da temperatura ao longo do dia e possível volatilização do aditivo ou contaminação por agentes externos.

Testes similares analisando o tempo de diluição e qualidade da água também foram realizados com os aditivos PAM e XG, mostrando comportamento semelhante ao do PEO. Devido aos resultados de diluição, todos os testes são realizados aguardando o mesmo tempo para a difusão do aditivo no solvente. Momentos antes de iniciar o teste, uma amostra é retirada para que a reologia desta seja analisada. A viscosidade para cada concentração trabalhada é mostrada de acordo com a Tabela 1.

	μ (mPa.s) – 25 °C			
Concentração (ppm)	PEO M _{v1} = 4x10 ⁶ g/mol	PAM M _{v2} = 5x10 ⁶ g/mol	XG M _{v3} = 2x10 ⁶ g/mol	
25	0,862	0,877	0,922	
50	0,914	0,904	0,986	
75	0,921	0,936	1,029	
100	0,973	0,945	1,077	
200	1,040	0,998	1,150	

Tabela 1. Viscosidades das soluções.

2.4 Descrição do experimento

Após a solução estar devidamente diluída e sua reologia analisada, o experimento é então realizado. Os 150 kg de solução são depositados no vaso de pressão onde o escoamento será iniciado e mantido por pressurização do vaso imposta por ar comprimido proveniente do compressor ou então, dependendo do teste, o escoamento é obtido a partir do uso da bomba centrífuga.

Quando o escoamento é realizado a partir de ar comprimido do compressor, o vaso de pressão já com solução é pressurizado a uma pressão específica, sendo essa mantida constante ao longo de todo o teste, uma válvula reguladora de pressão na saída do compressor permite isso. A partir do momento em que a pressão no vaso está em seu valor requerido, uma válvula é aberta e o escoamento é iniciado. A vazão de ar disponível pelo compressor é suficiente para manter a pressão no vaso com variação desprezível em relação à pressão de início e fim do teste.

Quando utilizado a bomba para escoar a solução, o vaso de pressão age apenas como um reservatório aberto ao ambiente e a bomba conectada em sua saída. Através do supervisório a bomba é acionada e sua vazão pode ser controlada a partir do controle da rotação do rotor.

Os principais resultados são realizados em função do número de passes. É dado como fim de um passe quando toda solução depositada no vaso de pressão escoa passando pela seção de teste e é depositada num reservatório no fim da tubulação. A solução

então retorna para o vaso de pressão, por uma tubulação de 1 ½" que liga o reservatório ao vaso, sendo esse retorno provido apenas pela gravidade devido a uma pequena inclinação da tubulação. Quando o compressor é utilizado, é necessário despressurizar o vaso de pressão para que a solução retorne.

Sucessivos passes são realizados, sendo assim possível analisar a redução de arrasto e degradação do aditivo passe por passe. Através do supervisório, dados das pressões nos transdutores, vazão e temperatura são aquisitados segundo a segundo durante o teste. A partir destes dados toda análise é feita.

2.5 Cálculo do fator de atrito e redução de arrasto, DR

O problema analisado é de acordo com Figura 11, escoamento em tubo de diâmetro D, fluido Newtoniano com densidade ρ e viscosidade μ , com vazão volumétrica Q devido a um diferencial de pressão $\Delta p = p_1 - p_2$.



Figura 11. Esquema do problema.

De acordo com a equação de Bernoulli, a pressão somente poderia variar se a velocidade variasse ou se o potencial variasse. Porém, sabe-se que é uma idealização, e que, devido ao atrito, a pressão variará mesmo em um tubo horizontal de seção constante. A partir de uma pequena modificação da equação de Bernoulli, a perda de carga entre os pontos 1 e 2 do problema em questão pode ser representado pela Equação (2):

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{v}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{v}_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{l_T}$$
(2)

Onde p₁ e p₂ são pressões estáticas, \bar{V}_1 e \bar{V}_2 velocidades médias, z₁ e z₂ respectivas coordenadas verticais, g sendo a aceleração local da gravidade e h_{I_T} a perda de carga total entre as seções 1 e 2.

A perda de carga total, h_{l_T} , é definida como a soma das perdas maiores, devido ao atrito, e as perdas menores ou localizadas, causadas por entradas, acessórios, mudanças de áreas, entre outros. Considerando que no problema não há nenhum acessório e o diâmetro é constante entre as seções 1 e 2, logo não existe perda localizada e a perda de carga total, h_{l_T} , é causada apenas pelo atrito entre o fluido e o tubo. Devido o tubo ser horizontal de seção constante, z₁ e z₂ são iguais bem como V₁ e V₂ também. Logo, a Equação (2) se resume a:

$$\left(\frac{p_1 - p_2}{\rho}\right) = h_{l_T}$$
(3)

Experiências mostram que, no escoamento turbulento completamente desenvolvido, a queda de pressão, Δp , causada por atrito em um tubo horizontal de área constante, é dependente do diâmetro, D, do comprimento, L, da rugosidade do tubo, *e*, da velocidade média do escoamento, \bar{V} , da massa específica, ρ , e da viscosidade do fluido, μ , conforme a Equação (4):

$$\Delta p = f(D, L, e, V, \rho, \mu)$$
(4)

A aplicação da análise adimensional resulta em uma correlação entre os parâmetros da forma:

$$\frac{\Delta p}{\rho V^2} = f\left(Re, \frac{L}{D}, \frac{e}{D}\right)$$
(5)

Sendo Reynolds, Re, para um tubo e fluido Newtoniano, definido como:

$$Re = \frac{\rho \overline{V} D}{\mu} \tag{6}$$

A partir de dados experimentais e manipulações dos parâmetros adimensionais, obtém-se uma expressão para o fator de atrito, que é função do número de Reynolds, Re, e da rugosidade, *e*, de acordo com a Equação (7):

$$f(Re,e) = \frac{2D(\Delta p/L)}{\rho \overline{V}^2}$$
(7)

Assim, o fator de atrito pode ser calculado através da aquisição de dados durante o experimento quando se obtém os valores de $\Delta p \in \overline{V}$.

O fator de atrito pode ser obtido através de dados experimentais reportados na literatura, como é o caso do diagrama publicado por L. F. Moody. No presente trabalho a região onde as pressões são tomadas o tubo é brunido, ou seja, tem-se a garantia de tubo liso, sendo assim a correlação de Blasius é utilizada para efeitos comparativos no o cálculo de *f*, representada pela Equação (8):

$$f = 0,316 \, Re^{-0.25} \tag{8}$$

O valor mínimo do fator de atrito proposto por Virk [15], quando a máxima redução de arrasto é atingida, MDR, é dado de acordo com a Equação (9):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9,5 \log_{10}\left(\frac{Re\sqrt{f}}{2}\right) - 16,2 \tag{9}$$

Para cálculo da redução de arrasto, é utilizada a definição proposta por Lumley:

$$\% DR = 100 \left(\frac{f_0 - f}{f_0}\right)$$
 (10)

Onde f_0 é o fator de atrito do solvente (água) e f o fator de atrito da solução polimérica.

A degradação polimérica é avaliada por meio do coeficiente de redução de arrasto relativo, DR', definido como:

$$DR' = \frac{\% DR(Np)}{\% DR_{máx}} \tag{11}$$

Sendo %DR(Np) a redução de arrasto em cada passe, definido pela Equação (10), e %DR_{máx} a redução de arrasto máxima observada no experimento, que na ocasião é igual a redução de arrasto no primeiro passe onde a solução ainda não encontra-se degradada.

Vale a pena ressaltar que f_0 e f são calculados para um mesmo valor do número de Reynolds. No caso do fator de atrito do solvente, vários testes abrangendo um determinado range de *Re* são realizados para calcular valores de fator de atrito e subseqüentemente obter uma curva de aproximação para uma função na forma f_0 = f(Re). A curva calculada experimentalmente para a bancada experimental do presente trabalho é apresentada na Equação (12):

$$f_0 = 0,1578 Re^{-0,1837} \qquad 50.000 \le Re \le 115.000 \tag{12}$$

A partir de obtida a curva da Equação (12), pode-se calcular a redução de arrasto comparando o fator de atrito da solução e do solvente para um mesmo número de Reynolds.

2.6 Critério de tratamento de dados

Antes de analisar uma série de resultados obtidos de uma amostra, é necessário verificar se há valores que, eventualmente, possam ser considerados dispersos, ou seja, valores que provavelmente não pertençam ao mesmo conjunto de resultados. Resultados anômalos podem afetar sensivelmente a média e comprometer a exatidão do processo, sendo razoável utilização de um critério impessoal para seu descarte. O método estatístico utilizado no presente trabalho para verificar se um dado pode ser considerado disperso é o critério de Chauvenet. Para uma determinada amostra de *n* eventos, o critério baseia-se em identificar o maior desvio da amostra, o que implica em calcular o desvio d_i de cada evento em relação à média, d_i = x_i - \bar{x} . O critério de eliminação de dados depende do parâmetro $d_{máx}/\sigma$, sendo dado por:

$$\frac{d_i}{\sigma} > \frac{d_{max}}{\sigma} \tag{13}$$

Onde d_{max} é o maior desvio aceitável e σ é o desvio padrão da amostra. Logo, quando a condição da Equação (13) é satisfeita, o valor do evento é excluído da análise. O valor de d_{max}/σ é função do número de eventos (*n*) da amostra, a Tabela 2 a seguir lista esses valores para diferentes números de leituras:

Número de leituras (n)	$rac{d_{m lpha x}}{\sigma}$
5	1,65
10	1,96
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14

Tabela 2. Critério de rejeição de Chauvenet.

Para aplicar o critério, primeiro calcula-se a média e o desvio padrão da amostra, em seguida calcula-se o desvio de cada evento e o compara de acordo com a condição da Equação (13), seguindo os valores de desvio máximo da Tabela 2, definindo assim se o valor é duvidoso e devendo ser eliminado ou não da amostra. Após todos valores considerados dispersos terem sido eliminados, um novo valor médio e um novo desvio padrão é calculado, sem incluir os pontos eliminados.

No experimento, amostras de dados da vazão e pressão são adquiridos para análise. Em cada passe, a solução leva cerca de 110 segundos para passar completamente pela seção de teste, sendo aquisitados valores em intervalos de 1 segundo, dessa forma são obtidos 110 leituras para cada variável ($\Delta p \in V$) a cada amostra (passe). Dessa forma, buscando na tabela, o valor do critério de rejeição de Chauvenet utilizado no trabalho é de 2,81, valores com desvios superiores são excluídos.

Para exemplificar o efeito da aplicação do critério, a Tabela 3 apresenta valores antes e após aplicação do método de Chauvenet em um teste realizado na bancada.

Parâmetro	Sem tratamento	Com tratamento	% diferença
${}^{\Delta p}/{}_{L}$ (Pa/m)	11020,2	10978,9	0,375
Q (m³/h)	3,892	3,888	0,102
f	0,01404	0,01401	0,172

Tabela 3. Efeito do critério de Chauvenet sobre os dados.

É fácil observar que os valores pouco se alteraram após utilização do critério de exclusão de dados, indicando que os resultados são poucos dispersos, fortalecendo a confiabilidade nos resultados apresentados pelo experimento.

3 RESULTADOS

Os resultados do presente trabalho se dividem em três partes principais: a primeira parte, seção 3.1, se destina a testes preliminares para verificar a precisão do experimento bem como calibração da bancada experimental. Na segunda parte, seções 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 o objetivo é de exibir um apanhado geral na redução de arrasto e degradação polimérica, dos três diferentes polímeros trabalhados (PEO, PAM e XG). Tais resultados se encontram também nos trabalhos publicados pela equipe em congressos, como CONEM, Encit e Rio Oil and Gas e também no trabalho que ainda será submetido à revista *Physics of Fluids* (veja [36], [37], [38] e [39]). Finalmente, na terceira parte, seção 3.7, é concentrado uma atenção especial à XG devido esta ter mostrado características peculiares em relação aos outros aditivos (PEO e PAM). DR é analisado em função do tempo e também do número de Reynolds em testes com circuito fechado utilizando a bomba centrífuga, onde existe intensas e localizadas tensões cisalhantes devido a característica do escoamento no rotor.

3.1 Calibração da Bancada Experimental

Inicialmente, com a finalidade de verificar a confiabilidade dos resultados e a precisão da bancada experimental, bem como a veracidade dos valores obtidos nos medidores de pressão e vazão, testes com água pura são realizados e comparados com valores do fator de atrito para a água encontrados na literatura.

O primeiro teste visa a confirmação de escoamento desenvolvido na seção onde as pressões são tomadas. No trecho de tubo de aço inoxidável de 1400 mm (brunido internamente) onde são aquisitadas as pressões, estão presentes 3 transdutores de pressão estáticos com distância de 500 mm entre si, sendo o primeiro transdutor instalado em uma tomada de pressão à 362 mm (x₀/D = 22) após o flange. De acordo com o que a teoria da mecânica dos fluidos no diz, em um escoamento horizontal desenvolvido e com seção transversal constante, a pressão cai uniformemente ao longo do tubo. Tendo isso em mente, diferentes testes com diferentes vazões (devido a diferentes pressões de entrada) utilizando água pura foram realizados e assim a

pressão em função da posição na seção de teste pôde ser avaliada. Os resultados são apresentados na Figura 12.



Figura 12. Pressão ao longo da seção de teste.

Os resultados demonstram que para os três testes realizados o coeficiente de correlação R² ≥ 0,9904, indicando que o local onde está localizado os transdutores é correto, pois o escoamento encontra-se desenvolvido.

Um segundo teste foi feito visando analisar o desenvolvimento da vazão e da queda de pressão ao longo de um passe, realizado com compressor. O teste tem por finalidade avaliar a partir de qual intervalo o escoamento pode ser dado como permanente e assim os dados serem aquisitados para a análise. A pressão de entrada (P_e) foi mantida constante em 250 KPa. O comportamento da vazão e da queda de pressão ao longo de um passe é apresentado na Figura 13.



Figura 13. Comportamento dos parâmetros do processo ao longo de um passe.

Pode-se observar que a partir de aproximadamente 26 segundos do início do escoamento, ambos os parâmetros, vazão e queda de pressão, seguem um comportamento praticamente constante, indicando escoamento desenvolvido e permanente a partir desse ponto.

Agora que se tem conhecimento da confiabilidade dos medidores e da região onde o escoamento pode ser tomado como desenvolvido, vários testes com água pura para diversos números de Reynolds foram realizados, utilizando compressor e bomba. O fator de atrito foi calculado de acordo com a Equação (7) e comparado com correlação proposta por Blasius (Equação 8), assim como apresentado na Figura 14. Os testes com compressor foram realizados variando a pressão no vaso de pressão, refletindo em variações na vazão do escoamento, já para o teste utilizando a bomba a vazão pode ser variada alterando a rotação do rotor em cada passe.



Figura 14. Teste validação da bancada, com compressor e bomba.

É possível observar que os dados experimentais do fator de atrito se aproximam muito da curva proposta por Blasius, indicando que a bancada experimental está montada corretamente e exibindo resultados confiáveis. O máximo desvio da curva de Blasius encontrado foi na ordem de 6%, o que é considerado bom para tal complexidade do experimento. O objetivo de tais testes não foi apenas para calibração da bancada, mas também a utilização dos dados experimentais do fator de atrito da água para formular uma função $f_0 = f(Re)$ e posteriormente serem utilizados no cálculo da redução de arrasto (Equação 10). Tal função é a que foi apresentada anteriormente pela Equação (12).

3.2 Resultados Preliminares

Após a validação da bancada experimental, depois de ter segurança de resultados compatíveis, testes preliminares foram feitos com objetivo de avaliar a repetitividade do experimento garantindo uma confiabilidade nos resultados. Para tal avaliação, foram realizados dois testes com sucessivos passes pela bancada de solução polimérica de PAM a concentração de 50 ppm, os testes foram realizados nas mesmas condições de operação e os valores da redução de arrasto foram comparados, assim como ilustrado na Figura 15:



Figura 15. Redução de arrasto em função do número de passes. Comparação entre dois testes sob as mesmas condições.

Pode-se observar que as duas curvas são muito próximas, o que confirma a estabilidade do bancada e repetitividade do experimento.

3.3 Análise do efeito da concentração na redução de arrasto e degradação do polímero em função do número de passes

Os testes que visam avaliar o comportamento do coeficiente de redução de arrasto (DR) em função do número de passes (Np) da solução pela bancada, tem os resultados exibidos na Figura 16, Figura 17 e Figura 18. Foram analisados os três tipos diferentes de polímero, PAM ($M_v = 5x10^6$ g/mol), PEO ($M_v = 4x10^6$ g/mol) e XG ($M_v = 2x10^6$ g/mol). As concentrações trabalhadas foram 25, 50, 75, 100 e 200 ppm. Os testes foram realizados depositando suavemente a solução de 150 kg no vaso de pressão, sendo posteriormente pressurizado a 2,5 bar e sucessivos passes realizados, assim como já descrito anteriormente. A Figura 16 ilustra o resultado obtido para Poliacrilamida.



Figura 16. Redução de arrasto e degradação de soluções com PAM (adaptado de Sandoval et al. *[39]*).

Percebe-se claramente que o aumento da concentração de aditivo proporciona uma melhor eficiência na redução de arrasto. Vários autores reportam o mesmo comportamento (veja [28], [22], [29], [40], [8], [25], [6] e [7]), acredita-se que com uma

maior quantidade de moléculas poliméricas presentes no escoamento, uma maior quantidade de vórtices são possíveis de serem suprimidos, contribuindo assim para aumento da redução no fator de atrito. Um outro resultado importante que se nota é o decréscimo da redução arrasto de acordo com o número de passes, para todas as concentrações, indicando cisão das macromoléculas e assim perda na eficiência em suprimir vórtices. Parte dos vórtices gerados pela turbulência do escoamento são suprimidos pelas moléculas poliméricas, porém esses mesmos vórtices também contribuem para sua degradação. É interessante notar que, para todas as concentrações, depois de um certo número de passes (Np=40) a redução de arrasto atinge um valor constante e diferente de zero, indicando que mesmo degradada, a solução polimérica continua com a característica redutora de arrasto.

A Figura 17 e Figura 18 ilustram os resultados para testes com PEO e XG. De modo geral, os efeitos da concentração na redução de arrasto e degradação em função de Np para PEO e PAM são semelhantes. Inicialmente tem um valor máximo (DR_{máx})e com o decorrer dos passes assume um valor mínimo constante assintótico (DR_{ass}).

DR_{máx} encontrado para ambos, PEO e PAM, são bastante próximos, em torno de 60% para 50 ppm e 70% para 200 ppm. A principal diferença observada está no valor assintótico da redução de arrasto (DR_{ass}), onde 50 ppm é de aproximadamente 10% para PEO e 24% para PAM (140% acima), quando a concentração é 200 ppm DR_{assin} está em torno de 30% para PEO e 40% para PAM (33% maior). Os resultados sugerem que as cisões moleculares são mais intensas para PEO do que para PAM, fazendo com que a redução de arrasto caia mais. Resultados semelhantes são reportados por Pereira et al. [25] e [24], Elbing et al. [28] e Vlassopoulos e Schowalter [41].



Figura 17. Redução de arrasto e degradação de soluções com PEO (adaptado de Sandoval et al. *[39]*).

Os resultados obtidos para 100 ppm de PEO vai ao encontro com reportado por Vanapalli et al. [22], que também analisou a degradação de 100 ppm de PEO com peso molecular semelhante ao utilizado no presente trabalho. Resultados próximos também não foram por acaso, o referente autor utiliza aparato experimental bastante semelhante ao nosso. Vanapalli obteve DR_{máx} em torno de 75% e após 12 passes (36m) por sua seção de teste, o valor que atingiu foi de %DR ≈ 45%. Para um teste similar, no presente trabalho foi encontrado DR_{máx} ≈ 70% e após 4 passes (40m) %DR ≈ 50%, o que mostra uma grande concordância entre os valores.

Analisando agora o aditivo XG, um resultado diferente é observado (Figura 18). Primeiramente pode-se observar menores valores na redução de arrasto no início do teste, uma outra caraterística nítida é que apenas 20 passes foram necessários para que a redução de arrasto atingisse valor assintótico. Vale relembrar que XG tem molécula rígida, enquanto as de PEO e PAM são flexíveis. Acredita-se que moléculas rígidas tem menos capacidade em suprimir vórtices. Benzi et al. [21] relata que polímeros flexíveis são mais efetivos na redução de arrasto devido sua contribuição para viscosidade cisalhante e sua capacidade de esticar (elasticidade), características que polímeros de cadeia rígida não possui. Paschkewitz et al. [42] obtiveram redução de arrasto na ordem de 26% em suas simulações numéricas para fibras rígidas, sugerindo que a elasticidade não é necessária para se obter níveis de DR em escoamentos turbulentos. Em relação aos resultados de XG no presente trabalho (Figura 18), é interessante notar que o valor de DR para XG cai pouco no decorrer dos passes, sugerindo que a degradação tem desempenho menos importante para esse aditivo. Estudos como de Pereira et al. [25] mostram que o decréscimo de DR para XG não é predominantemente devido à degradação, mas sim por uma mudança na estrutura da molécula, acredita-se que ela sofre uma espécie de desgaste. Outra característica que Pereira cita é que as moléculas de XG são propícias a formarem agregados, sendo esses desfeitos com a turbulência, contribuindo para diminuição da eficiência na redução de arrasto.



Figura 18. Redução de arrasto e degradação de soluções com XG (adaptado de Sandoval et al. [39]).

O valor acumulado de DR para PEO tende a ser bem maior que o valor acumulado durante os passes para XG, porém observa-se que o valor DR_{ass} de ambos são bem

próximos, para todas a concentrações trabalhadas. Num ponto de vista prático, a área sob a curva DR vs. Np pode ser interpretada como unidades de economia de energia, sendo assim, quando analisado escoamento em tubo de longa distância, a diferença entre eficiência de PEO e XG tende a desaparecer, apresentando ambas reduções de arrasto uma mesma performance. Vale a pena ressaltar que o valor do peso molecular de XG é equivalente à metade do valor do PEO.

Para as concentrações trabalhadas não foi possível o alcance da máxima redução de arrasto, evidenciado por Virk [15], onde o qual a partir do incremento na concentração não se observa mais um incremento na redução de arrasto, estando a solução saturada. A Figura 19 foi construída sob perspectiva do diagrama de Moody, os dados utilizados foram reorganizados a partir dos resultados para o PAM (Figura 16), sendo apenas o valor mínimo do fator de atrito considerado, que nesse caso é o fator de atrito calculado no primeiro passe antes de existir degradação aparente.



Figura 19. Efeito da concentração sobre redução no fator de atrito, PAM.

Os dados exibidos nesse formato torna mais evidente a influência da concentração na redução do fator de atrito. As linhas que delimitam a região do fator de atrito são

ilustradas, sendo a curva de Blasius (linha azul) e Lei de Virk (linha verde). Assim como já mostrado anteriormente (Figura 14), o fator de atrito do solvente tem valores de acordo com proposto por Blasius, e a medida que polímero é adicionado, o fator de atrito tende a cair, sendo que com aumento da concentração este segue caminho ao encontro da curva de Máxima redução de arrasto (MDR), resultado de acordo com já encontrado por vários autores (veja [28], [8], [15] e [7]). É possível observar que o efeito da concentração vai ser tornando menos evidente para maiores valores, indicando que a solução está tendendo à concentração crítica saturada. Apesar dos valores de DR_{máx} encontrados serem bem próximos da MDR (70% para 200 ppm PEO, sendo 80% a MDR), acredita-se que para as características da bancada não seja possível atingir MDR. Bordas vivas na entrada, seções de redução do diâmetro, a própria válvula esfera que proporciona o início do escoamento, contribuem para uma certa degradação do polímero antes que esse chegue na seção de teste onde a redução de arrasto é analisada. Sendo assim, presume-se que a solução chega, em pequenas escalas, parcialmente degradada na seção de tomadas de pressão.

3.4 Análise do efeito da concentração na redução de arrasto relativa, DR', em função do número de passes

Com intuito de exibir diretamente a perda de eficiência, relacionada à cisões macromoleculares, os resultados anteriores são reorganizados e utilizados para destacar a resistência quanto à degradação. A Equação 11, da redução de arrasto relativa (DR') é utilizada. A Figura 20 foi construída com dados da redução de arrasto de soluções com PAM.



Figura 20. Redução de arrasto relativa, PAM (adaptado de Sandoval et al. [39]).

Nota-se que a eficiência quanto à degradação também é uma função crescente da concentração, ou seja, o aumento da concentração provoca uma diminuição nas cisões das macromoléculas. Pereira e Soares [24], Vanapali et al. [22] e Elbing et al. [28] reportam que o aumento da concentração, consequentemente o aumento do número de macromoléculas, aumenta a resistência média da solução contribuindo assim para redução na degradação. Devido a um maior número de macromoléculas, a tensão atuando em cada uma se torna menos intensa diminuindo as cisões. Ocorre também um aumento da viscosidade extensional da solução (veja [8]), implicando em menores tensões extensionais e consequentemente a taxa de degradação cai. Nota-se que DR' chega a um patamar constante (DR'ass), indicando que perda de eficiência é cessada. Acredita-se que, para o nível de turbulência presente, o nível de macromoléculas degradadas é tal que a força dos vórtices não é mais suficiente para continuar o processo de cisões. A diferença 1 - DR'ass representa a máxima perda de eficiência.

A Figura 21 ilustra os valores de DR' para PEO em todo range de concentração trabalhada. É possível observar que PAM e PEO exibem comportamentos similares

quanto à redução de arrasto relativa, DR' é função crescente da concentração. Presume-se que um incremento de *c* torna a solução de PEO e PAM mais forte e a perda relativa de eficiência cai. Uma diferença é observada na máxima perda de eficiência (1 - DR'_{ass}), no caso de c = 200 ppm a perda de eficiência para PAM e PEO é respectivamente 40% e 60%. Pereira et al. [24] ilustra através de seus resultados que PEO tem maior módulo de elasticidade que PAM, indicando maior elasticidade, sendo assim, acredita-se que a molécula de PEO é capaz de esticar mais que PAM absorvendo maior quantidade de energia (PEO e PAM na Figura 16 e Figura 17 têm valores de DR_{máx} similares, mesmo PEO possuindo menor massa molecular), porém devido ao maior estiramento, a molécula de PEO é mais susceptível à degradação. Elbing et al. [28] e Vlassopoulos e Schowalter [41] reportam que PAM é mais resistente à degradação que PEO.



Figura 21. Redução de arrasto relativa, PEO (adaptado de Sandoval et al. [39]).

Um comportamento diferente, com relação à degradação, é observado para XG (Figura 22). Não é possível notar uma diferença significante da resistência da solução em função da concentração, existe aí uma influência complexa de *c*. Se uma concentração crescente deve tornar a solução mais forte quanto à degradação, o que

não é evidente para XG, a ideia da degradação ser menos influente e a perda de eficiência ser predominantemente devido à desaglomeração das moléculas é reforçada. O fato de a molécula ser rígida e não sofrer estiramento também pode contribuir para menores índices de degradação. É fato, o mecanismo de redução de arrasto em polímeros rígidos é muito diferente dos flexíveis.



Figura 22. Redução de arrasto relativa, XG (adaptado de Sandoval et al. [39]).

3.5 Análise do escoamento proporcionado pelo compressor e pela bomba

Com objetivo de analisar a resistência da solução de forma diferente, testes utilizando escoamento proporcionado pela bomba centrífuga são realizados, onde devido à sua forma construtiva, tensões cisalhantes severas são impostas quando a solução passa através do rotor. A Figura 23 exibe os resultados comparando escoamento proporcionado por ar comprimido e pela bomba centrífuga para os três aditivos (PEO, PAM e XG), sendo apenas uma concentração intermediária analisada, 50 ppm. Os resultados com compressor são os mesmos já exibidos anteriormente (Figura 16, Figura 17 e Figura 18), uma pressão constante de 2,5 bar é imposta no vaso de pressão, sendo realizados 40 passes das soluções de PEO e PAM, e 20 passes de

XG pela seção de teste. Para os testes realizados com a bomba, o controle da vazão a partir da rotação do rotor foi utilizado para que se atingisse o mesmo número de Reynolds em cada passe correspondente quando utilizado compressor. Assim, podese comparar a redução de arrasto e a degradação polimérica no mesmo *Re* para escoamento proporcionado pela bomba centrífuga ou por ar comprimido, logo, a diferença obtida entre as curvas se deve exclusivamente pelo funcionamento e características construtivas da bomba. Vale a pena ressaltar que a bomba se encontra antes da seção de teste, ou seja, a solução passa antes pela bomba para depois seguir para seção de teste.



Figura 23. Redução de arrasto e degradação polimérica, Compressor vs. Bomba (adaptado de Sandoval et al. *[39]*).

E possível observar um resultado muito interessante, devido às características do escoamento através do rotor, que impõe intensa e localizada cisão polimérica, o fluxo através da bomba centrífuga quebra totalmente a solução de PEO com apenas 12 passes da solução pela seção de teste, porém para o aditivo PAM não é observado total degradação, mesmo após 20 passes, sendo este atingindo um valor constante de redução de arrasto em torno de 7%. É interessante notar que há uma intensa

degradação logo no primeiro passe, sendo DR_{máx} para PEO e PAM utilizando compressor respectivamente 62% e 58% e quando utilizado a bomba esse valor cai em torno de 33% e 34%. O resultado reforça a ideia do PAM ser mais resistente que PEO, assim como comentado anteriormente, e reportado por outros autores (veja [28], [22], [25] e [41]). Para o aditivo de moléculas rígidas, as curvas utilizando bomba e compressor para o escoamento são relativamente próximas, esse resultado para XG não é nada além do esperado quando se acredita na ideia de degradação ter menos influência na perda de eficiência, sendo essa perda dada predominantemente devido a desaglomeração das moléculas. Com tais resultados apresentados, tem-se muitas razões para acreditar na hipótese de que a degradação não é o principal mecanismo para perda de eficiência em soluções de XG, e ainda, como Pereira et al. [25] encontrou resultados com comportamento parecido utilizando geometria rotativa de dupla folga, há fortes indícios que tal fenômeno é independente da geometria.

3.6 Análise do fluxo e da queda de pressão através da seção de teste

Um ponto muito prático é analisar o aumento da vazão e a queda de pressão através da seção de teste. Pode-se observar diretamente a utilidade do uso de redutores de arrasto, pois na prática, se está interessado em um aumento da vazão ou então redução na queda de pressão, possibilitando diminuição nos custos.

É esperado que, fixada a pressão de entrada, a vazão aumente quando solução polimérica é utilizada, assim como exibido na Figura 24. Este fluxo aumenta com a concentração e cai a medida que Np aumenta, chegando a uma vazão constante em Np=40 (para XG, Np=20). O resultado é coerente com a ideia de que maiores concentrações possibilitam maiores níveis de redução de arrasto, sendo a solução degradada a medida que é submetido à turbulência, passe-por-passe. Em relação à queda de pressão, Figura 25, vale ressaltar que o diferencial total de pressão no experimento foi mantido fixo, $\Delta p_{total} = P_e - P_s = 250$ KPa, onde P_e é a pressão de entrada, obtida pelo compressor, e P_s a pressão de saída (igual a atmosférica). Apesar de Δp_{total} ser fixo, a queda de pressão na seção de teste cai quando redutores de arrasto são utilizados. Quando a vazão é mantida constante, é fácil imaginar uma redução na queda de pressão ($\Delta p/L$), porém não é um resultado óbvio $\Delta p/L$ cair

enquanto Δp_{total} é mantido constante. A diminuição de $\Delta p/L$ pode ser explicado devido a uma redução da tensão cisalhante na parede, τ_w .



Figura 24. Vazão em função do número de passes, aditivo PAM (adaptado de Sandoval et al. [39]).



Figura 25. Queda de pressão em função do número de passes, aditivo PAM (adaptado de Sandoval et al. *[39]*).

A redução no fator de atrito é sentida simultaneamente num incremento da vazão e uma redução da queda de pressão ($\Delta p/L$). Deve-se tomar cuidado quando se olha quantitativamente para o valore de DR, pois conclusões erradas podem ser tomadas. Por exemplo, 200 ppm de PAM obteve uma redução de arrasto máxima em torno de 69%, porém o incremento máximo da vazão foi de 46%. Isto ocorre porque a contribuição para redução de arrasto não é apenas devido a um aumento na vazão, mas também por uma simultânea redução da queda de pressão. Em sistemas onde a pressão total é mantida fixa, a impressão que se tem é que parte da eficácia do uso de redutores de arrasto é desperdiçada tendo em vista que nem toda redução de arrasto é convertida em aumento de vazão. Porém, vale a pena ressaltar que devido a uma menor tensão de cisalhamento na parede (τ_w) , consequentemente uma menor queda de pressão, a pressão estática do escoamento é menor, logo, possibilidades de falhas em uma tubulação devido à elevadas pressões serão menores, possíveis vazamentos também são minimizados. Tomando como exemplo, fixando-se a pressão de entrada em 250 KPa, durante o escoamento a pressão estática indicada no primeiro transdutor foi de aproximadamente 57,8 KPa para solvente puro (água) e 41,7 KPa para solução com 200 ppm de PAM, valor 38,3% menor. Uma segunda análise que pode ser feita é quando se mantém fixa a vazão, onde o efeito da redução da pressão estática é muito mais evidente. Para a mesma solução (200 ppm de PAM), a vazão máxima atingida foi de 4,87 m³/h, sendo observado uma pressão estática de 41,7 KPa no primeiro transdutor, quando para o solvente puro, a pressão atingida quando uma vazão de 4,87 m³/h é imposta, foi de 131,9 KPa, 3,15 vezes maior. Para PEO e XG, os efeitos do aumento da vazão e redução na queda de pressão seguem comportamento similar ao exibido pelo PAM, sendo XG em níveis inferiores devido à menor eficiência na redução de arrasto (dados não exibidos).

3.7 Análise da perda de eficiência da Goma Xantana em escoamento com circuito fechado

A partir dos testes anteriores, onde mostraram uma elevada resistência quanto à perda de eficiência de XG devido à degradação mecânica, foram feitos uma série de testes com objetivo de avaliar de outras formas a resistência da molécula. Utilizando a bomba com escoamento operando em circuito fechado, foram realizados testes mantendo-se a vazão constante, onde se pôde obter uma curva da redução de arrasto em função do tempo. Também foram realizados outros testes, onde se variou a vazão do escoamento para se obter uma relação da redução no fator de atrito com o número de Reynolds.

3.7.1 Redução de arrasto de Goma Xantana em circuito fechado: vazão constante

Com a finalidade de avaliar a redução de arrasto da XG bem como a perda de sua eficiência, testes com diferentes concetrações foram realizados se mantendo fixa a vazão em escoamento com circuito fechado proporcionado pela bomba centrífuga. A vazão setada foi de 4,1 m³/h (vazão obtida na máxima rotação da bomba quando utilizado solvente puro), os testes foram conduzidos durante o período de uma hora onde o valor assintótico de DR foi seguramente atingido. O resultado é apresentado na Figura 26.



Figura 26. Redução de arrasto em função do tempo de escoamento em circuito fechado. Soluções com XG.

Assim como os testes anteriores, realizados com compressor, a redução de arrasto é fortemente uma função da concentração. Observa-se também que a DR cai tendendo a uma valor assintótico (DR_{ass}) em um tempo de aproximadamente 1000 s para todas as concentrações. Para que se tenha uma comparação mais clara entre resultados com compressor e bomba, ambos os dados foram plotados no mesmo gráfico (dados da Figura 18 sobrepostos na Figura 26), assim como se pode observar na Figura 27. A abcissa superior indica o número de passes, Np, (relacionada aos testes com compressor) e a inferior o tempo (relacionada aos testes com bomba). Os símbolos cheios exibem os resultados obtidos com compressor e os vazios resultados com a bomba. Apenas 2400 s dos dados do teste com bomba foram plotados, devido a uma conveniência, com a tentativa de igualar as escalas (tempo e Np), e devido a partir desse tempo já ter sido atingido DR_{ass}.



Figura 27. Testes realizados com compressor e bomba. Soluções de XG.

Observa-se que as curvas em escoamento fechado utilizando a bomba centrífuga se assemelham muito quando o teste é realizado com compressor. Uma pequena variação é observado apenas nas concentrações maiores, 100 e 200 ppm. Uma hipótese para este resultado é que pode ocorrer, para as concentrações mais altas, interações entre as macromoléculas sendo essas mais facilmente desfeitas quando escoamento é proporcionado pela bomba devido às altas taxas de cisalhamentos quando a solução passa através do rotor centrífugo, contribuindo deste modo para uma menor eficiência na redução de arrasto. O fluxo através do rotor centrífugo da bomba é muito complexo, porém não é difícil imaginar que este adquire velocidades e consequentemente turbulência a níveis muito acima dos que são alcançados quando o escoamento é proporcionalo pelo ar comprimido. Sabe-se que a degradação mecânica é proporcional à turbulência (veja [23], [28], [20], [43], [25], [22], [7], [41]), logo, devido as curvas de testes realizados impondo níveis de turbulência completamente diferentes nas soluções de XG terem apresentado comportamento muito próximo, exibindo valores com desvios relativamente pequenos, pode-se

acreditar fortemente que a perda de eficiência em soluções de XG não é devido à degradação mecânica. Um outro fator como desaglomeração, desgaste ou algum agente biológico pode estar agindo e promovendo a perda de eficiência. Liberatore et al. [33] sugere que a perda de eficiência de XG se deve principalmente à redução gradual do número de emaranhados. Uma conclusão que ainda pode ser observada é que essa redução na eficiência é um fator pouco sensível à turbulência.

Foi exposto anteriormente uma análise da vazão e queda de pressão ao longo da seção de teste guando experimento foi realizado com compressor e a pressão de entrada era mantida constante (Figura 24 e Figura 25). Na ocasião, se observou que mesmo mantida a queda de pressão total no experimento constante, uma redução da queda de pressão ao longo da seção de teste foi observada quando utilizadas soluções aditivadas, sendo o motivo de tal resultado o fato de o efeito da redução de arrasto ser de um incremento na vazão e simultaneamente uma redução na queda de pressão, um efeito não muito óbvio. Em testes realizados com a bomba, devido ao controle da vazão ser possível, pode-se neste caso realizar experimentos mantendo fixa a vazão e analisar isoladamente a redução da queda de pressão ao longo da seção de teste. Na Figura 28 foi plotada na perspectiva de se exibir o nível de redução de arrasto bem como a queda de pressão na seção de teste em função do tempo de escoamento da solução. Os dados de DR são os mesmos já exibidos na Figura 26, sendo apenas a concentração de 200 ppm focada (o mesmo comportamento foi observado para outras concentrações). O eixo vertical da esquerda relaciona a DR e o da esquerda a queda de pressão. A linha contínua representa a queda de pressão (respectivamente 15,84 KPa/m) quando utilizado solvente puro à mesma vazão da solução aditivada (4,1 m³/h).



Figura 28. Redução de arrasto e queda de pressão ao longo da seção de teste. 200 ppm de XG.

Como o esperado, nota-se que a há uma redução na queda de pressão quando comparado a solução polimérica com solvente puro. É interessante observar que a queda de pressão vai aumentando no decorrer do tempo da solução escoando e tende a um valor assintótico no final do experimento, um comportamento muito parecido com o que ocorre com redução de arrasto, porém em sentidos contrários. Pode-se concluir que toda perda de eficiência do aditivo devido à degradação, ao desgaste ou à desaglomeração das macromoléculas (degradação possivelmente a menos influente) é sentida diretamente num aumento da queda de pressão ao longo da seção de teste, ou seja, um aumento no arrasto. Nota-se também que o valor assintótico da queda de pressão é bem inferior comparado ao do solvente, cerca de 21% menor, valor coerente pois a solução ainda possui a capacidade de redução de arrasto (DR_{ass} = 28%).

3.7.2 Redução de arrasto de XG em circuito fechado: variando a vazão

Como observado anteriormente, as macromoléculas de XG são relativamente resistentes quanto à perda de eficiência, sendo essa perda pouco dependente do nível de turbulência. A partir deste conceito, é possível realizar testes em circuito fechado com a bomba variando sua rotação com a finalidade de avaliar a redução no fator de atrito em função do número de Reynolds, para diversas concentrações. Os próximos testes foram realizados sob essa perspectiva. Os resultados, ilustrados na Figura 29, foram realizados a partir das soluções utilizadas nos testes já exibidos na Figura 26, ou seja, primeiramente a solução foi submetida ao escoamento a vazão constante durante uma hora (Figura 26), tempo suficiente para que DR_{ass} fosse atingido. Logo após foi variado a rotação do rotor da bomba, variando a vazão e consequentemente o número de Reynolds. Devido à solução já ter sido submetida ao escoamento e DR_{ass} sido atingido, qualquer queda de eficiência não será causada por degradação. Por causa de limitações inerentes ao experimento, o range de Reynolds alcançado não é muito grande.



Figura 29. Fator de atrito em função do número de Reynolds. Soluções de XG.

Observa-se que a redução no fator de atrito depende fortemente da concentração, porém fracamente dependente de Reynolds. Jaafar et al. [26] e Pereira et al. [25] reportam resultados com moléculas rígidas em escalas Prandtl von Kármán, onde as curvas para diferentes concentrações são visivelmente paralelas. É possível observar comportamento semelhante, indicando pouca dependência do número de Reynolds na redução do fator de atrito. Outros autores também já reportaram tal característica (veja [44], [33] e [15]).

Afim de exibir mais claramente que o comportamento da redução de arrasto em soluções de XG é relativamente insensível ao número de Reynolds, foi construída a Figura 30. Os dados da figura anterior foram reorganizados sob a perspectiva de DR em função de Re. Observa-se claramente que apesar de existir uma variação no nível de turbulência do escoamento, o nível de redução de arrasto permanece em torno do mesmo valor, dependendo apenas da concentração. Vale a pena notar que os níveis de DR da Figura 30, são os mesmos de DR_{ass} exibidos na Figura 26, respectivamente 10, 17 e 28% para as concentrações 50, 100 e 200 ppm.



Figura 30. Redução de arrasto em função do número de Reynolds. Soluções de XG.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados evidenciaram o efeito da concentração nos níveis de redução de arrasto, sendo esses, função crescente de c. Porém, a eficiência do aditivo não é constante, sendo perdida devido à turbulência do escoamento. Ficou claro que a dinâmica na redução de arrasto é completamente diferente entre polímeros com moléculas rígidas e moléculas flexíveis. Níveis mais altos de DR são observados nas moléculas flexíveis, uma possível explicação é baseada na característica elástica dessas soluções que são capazes de esticar absorvendo energia dos vórtices, algo que polímeros de cadeia rígida não são aptos de realizar. Porém, acredita-se que essa capacidade de esticar seja responsável pela maior susceptibilidade das cisões intramoleculares acontecer. Percebeu-se que os resultados estiveram de acordo com esta hipótese, visto que XG apresentou uma resistência muito maior que PEO e PAM. Quando foi comparado o escoamento proporcionado pela bomba em relação ao compressor, a perda de eficiência na redução de arrasto para PEO foi total, para o PAM houve uma redução porém ainda apresentou níveis de DR, já para XG quase não se observou redução nos níveis de DR. Pode-se concluir que a degradação mecânica é forte função dos níveis de turbulência em polímeros de cadeia flexível, porém pouco influente em aditivos de cadeia rígida. Como os autores de Liberatore et al. [33] sugerem, a perda de eficiência de XG é devido principalmente à uma redução gradual de emaranhados. Porém, deve-se tomar cuidado com escalas de tempo relativamente longas, onde a degradação biológica também pode influenciar.

Trabalhos futuros poderão ser desenvolvidos abordando diversas outras análises, tais como: testes envolvendo outros tipos de aditivos (dica: os bioaditivos baba de quiabo, babosa, fibras em geral). Uma implementação na bancada também se faz necessário, adaptar resistências já disponíveis para que se possa avaliar o efeito da temperatura, procurar aumentar o trecho reto de tubulação onde se obtém o diferencial de pressão, para que assim se possa trabalhar com níveis de turbulência inferiores sem comprometer a veracidade dos resultados. Analisar se há efeitos sinergéticos em DR na mistura de polímeros (assim como já está sendo feito).

5 REFERÊNCIAS

- [1] A. G. Fabula, "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction," *Trans ASME J Basic Engng*, pp. 453-455, 1971.
- [2] L. A. Bernardo e I. Andreolli, "Exportação de petróleo através de oleodutos: alguns aspectos importantes a serem considerados no projeto," em *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2014*, Rio de Janeiro, 2014.
- [3] H. L. Greene, R. F. Nokes e S. C. Thomas, "Drag reduction in pulsed flow of blood," *Medical Research Engineering*, pp. 19-22, 1970.
- [4] R. A. Mostardi, H. L. Greene, R. F. Nokes, L. C. Thomas e T. Lue, "The effect of drag-reducing agents on stenotic flow disturbances in dogs," *Biorheology*, vol. 13, 1976.
- [5] L. K. Bessa, J. F. Belletati, L. Santos, V. L. Rossoni e P. J. Ortiz, "Drag reduction by polyethylene glycol in the tail arterial bed of normotensive and hypertensive rats," *Braz J Med Biol Res,* vol. 44, pp. 767-777, 2011.
- [6] A. B. Toms, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight," *Proceedings of the International Congress of Rheology*, pp. 135-141, 1948..
- [7] C. M. White e M. G. Mungal, "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction," *Annual Review of Fluid Mechanics,* vol. 40, pp. 235-256, 2008.
- [8] J. L. Lumley, "Drag reduction by additives," *Annual Review of Fluid Mechanics,* vol. 11, p. 367–384, 1969.
- [9] M. Tabor e P. G. D. Gennes, "A cascade theory of drag reduction," *Europhysics Letter*, p. 519–522, 1986.

- [10] B. H. Zimm, "Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefrigence and dielectric loss," *Journal of Chemical Physics*, vol. 24, pp. 269-278, 1956.
- [11] R. H. J. Sellin, J. W. Hoyt, J. Poliert e O. Scrivener, "The effect of drag reducing additives on fluid flows and there industrial applications part ii: present applications and futures proposals," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 20, pp. 235-292, 1982.
- [12] C. H. Hershey e L. J. Zakin, "A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions," *Chemical Engineering Science*, vol. 22, pp. 1847-1857, 1967.
- [13] A. Gyr e H. Bewersdorff, "Drag reduction of turbulent flows by additives," em *Kluwer Academic*, Dordrecht, The Netherlands, 1995.
- [14] S.-Q. Yang e D. Ding, "Drag reduction induced by polymer in turbulent pipe flows," *Chemical Engineering Science*, vol. 102, pp. 200-208, 2013.
- [15] P. S. Virk, "Drag reduction fundamentals," AIChE Journal, vol. 21, p. 625–656, 1975.
- [16] M. D. Warholic, H. Massah e T. J. Hanratty, "Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of reynolds number, concentration and mixing," *Experiments in Fluids*, vol. 27, p. 461–472, 1999.
- [17] P. K. Ptasinski, F. T. M. Nieuwstadt, B. H. A. A. van den Brule e M. A. Hulsen, "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction," *Flow, Turbulence and Combustion,* vol. 66, pp. 159-182, 2001.
- [18] N. S. Chemloul, "Experimental study of the drag reduction in turbulent pipe flow," *Energy*, vol. 64, pp. 818-827, 2013.
- [19] Y. Dubief, C. M. White, V. E. Terrapon, E. S. G. Shaqfeh, P. Moin e K. Lele, "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows," *J. Fluid Mech*, vol. 514, pp. 271-280, 2004.

- [20] A. F. Horn e E. W. Merrill, "Midpoint scission of macromolecules in dilute solution," *Nature*, vol. 312, pp. 140-141, 1984.
- [21] I. Procaccia, V. S. L'vov e R. Benzi, "Colloquium: Theory of drag reduction by polymers in wall-bounded turbulence," *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, pp. 225-247, 2008.
- [22] S. Vanapalli, T. Islam e J. Solomon, "Scission-induced bounds on maximum polymer drag reduction in turbulent flow," *Physics of Fluids 17,* 2005.
- [23] B. R. Elbing, M. J. Solomon, M. Perlin, D. R. Dowling e S. L. Ceccio, "Flowinduced degradation of drag-reducing polymer solutions within a high-reynoldsnumber turbulent boundary layer," *J. Fluid Mech*, vol. 670, pp. 337-364, 2011.
- [24] A. S. Pereira e E. J. Soares, "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pp. 9-22, 2012.
- [25] A. S. Pereira, R. M. Andrade e E. J. Soares, "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," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pp. 72-87, 2013.
- [26] A. J. Jaafar, M. P. Escudier e R. J. Poole, "Turbulent pipe flow of a drag-reducing rigid "rod-like" polymer solution," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 161, pp. 86-93, 2009.
- [27] P. S. Virk, D. C. Sherman e D. L. Wagger, "Additive equivalence during turbulent drag reduction," *AIChE Journal*, vol. 43, pp. 3257-3259, 1997.
- [28] B. R. Elbing, E. S. Winkel, M. J. Solomon e a. S. L. Ceccio, "Degradation of homogeneous polymer solutions in high shear turbulent pipe flow," *Exp Fluids*, vol. 47, p. 1033–1044, 2009.

- [29] P. S. Virk, H. S. Mickley e a. K. A. Smith, "The ultimate asymptote and mean flow structure in toms' phenomenon," *ASME-Journal of Applied Mechanics*, vol. 37, p. 488–493, 1970.
- [30] A. Steele, I. S. Bayer e E. Loth, "Pipe flow drag reduction effects from carbon nanotube additives," *Carbon,* vol. 77, p. 1183–1186, 2014.
- [31] H. Usui, K. Maeguchi e Y. Sano, "Drag reduction caused by the injection of polymer thread into a turbulent pipe flow," *Physics of Fluids*, vol. 31, pp. 2518-2523, 1988.
- [32] A. S. Pereira, Projeto de graduação Projeto de bancada para análise experimental de redução de arraste em escoamentos turbulentos por injeção de aditivos, Vitória: UFES, 2009.
- [33] N. B. Wyatt, C. M. Gunther e M. W. Liberatore, "Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, p. 25–31, 2011.
- [34] J. F. P., Principles of Polymer Chemistry, Ithaca, NY: Cornell University Press, 1971.
- [35] L. H. Petrie, S. Deutsch, A. T. Brungart e A. A. Fontaine, "Polymer drag reduction with surface roughness in flat-plate turbulent boundary layer flow," *Exp Fluids*, pp. 8-23, 2003.
- [36] G. A. B. SANDOVAL, E. J. SOARES, F. THOMAZ, R. T. SILVA, L. A. S. SILVA e A. S. PEREIRA, "Degradation of flexible polymers in turbulent drag reducing flows in pipes," em *Rio Oil & Gas*, Rio de Janeiro - RJ / Brasil, 2014.
- [37] G. A. B. SANDOVAL, F. THOMAZ, R. T. SILVA, E. J. SOARES e L. A. S. SILVA, "Drag reduction of flexible polymers degradation in turbulent pipe flows," em 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - Encit, Belém - PA / Brasil, 2014.
- [38] E. J. SOARES, L. A. S. SILVA, R. T. SILVA, F. THOMAZ, G. A. B. SANDOVAL e A. S. PEREIRA, "Redução de arrasto e degradação de polímeros flexíveis em

escoamentos turbulentos em dutos," em *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Uberlândia - MG / Brasil, 2014.

- [39] G. A. B. Sandoval, L. A. S. Silva, R. T. Silva, F. Thomaz, A. S. Pereira e E. J. Soares, "Loss of efficiency of polymeric drag reducers induced by high Reynolds numbers in tubes with imposed pressure," *Physics of Fluids*, submitted, 2014.
- [40] V. C. Bizotto e E. Sabadini, "Poly(ethylene oxide) x polyacrylamide. which one is more," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 25, pp. 1844-1850, 2008.
- [41] D. Vlassopoulos e W. R. Schowalter, "Characterization of the non-Newtonian flow behavior of drag-reducing fluids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 49, p. 235–250, 1993.
- [42] J. Paschkewitz, Y. Dubief, C. D. Dimitropoulos, E. S. G. Shaqfeh e P. Moin,
 "Numerical simulation of turbulent drag reduction using rigid fibres," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 518, p. 281–317, 2004.
- [43] T. Moussa e C. Tiu, "Factors afecting polymer degradation in turbulent pipe flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681-1692, 1994.
- [44] H. W. Bewersdorff e R. P. Singh, "Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions," *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 617-627, 1988.

6 ANEXOS

6.1 Equipamentos que compõe o experimento e suas especificações

6.1.1 Bomba centrífuga

- 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.

Curva característica da bomba:



Figura 31. Curva da bomba centrífuga Dancor, modelo CAM-W6C.

6.1.2 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.

6.1.3 Vaso de pressão

- Fabricante: Engetank;
- Capacidade volumétrica: 350 litros,
- Paredes em chapa de aço SA-36 com 4,75 mm de espessura;
- Margem de sobre-espessura de corrosão considerada de 1,50mm;
- 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).

6.1.4 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.

6.1.5 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: ¼" BSP;
- Fornecidos com certificado de calibração RBC Inmetro (Rede Brasileira de Calibração).

Dados obtidos na calibração para cada transdutor:

PT-01

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

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 + 3,197659*x*

6.1.6 Termopares

- Fabricante: lope;
- Tipo: J (ferro/cobre-níquel);
- Faixa de utilização: -40 a 750°C
- Adequados para uso no vácuo, em atmosferas oxidantes, redutoras e inertes.

6.1.7 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).

6.1.8 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).

6.2 Tela principal do supervisório



Figura 32. Supervisório de aquisição de dados e controle do experimento. Desenvolvido sob plataforma LabVIEW. Imagem obtida durante um teste com bomba a vazão constante igual a 4,1 m³/h.