

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS ANTÔNIO SILVEIRA SILVA

**REDUÇÃO DE ARRASTE E DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM  
ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS.**

VITÓRIA

2014

LUCAS ANTÔNIO SILVEIRA SILVA

**REDUÇÃO DE ARRASTE E DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM  
ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

VITÓRIA

2014

LUCAS ANTÔNIO SILVEIRA SILVA

**REDUÇÃO DE ARRASTE E DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS FLEXÍVEIS EM  
ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM DUTOS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 22 de maio de 2014.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Edson José Soares - Orientador**  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

**Prof. André Leibsohn Martins - Membro Externo**  
Petrobras

---

**Prof. Renato do Nascimento Siqueira - Membro Interno**  
Universidade Federal do Espírito Santo

VITÓRIA

2014

*”Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

*Madre Teresa de Calcuta*

À minha esposa e aos meus pais.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho.

Agradeço à minha família por toda força que me proporcionaram. À minha mãe e meu pai, Evangeli Soares Silveira e José Antônio da Silva, por me dar amor e carinho mesmo nos momentos de nervosismo por minha parte. Aos meus queridos irmãos Pedro Henrique e João Vitor em sempre me dar forças para querer vencer.

Agradeço à minha esposa, Izabela Mori, por todo amor e companheirismo nesses últimos oito anos.

Agradeço ao meu professor e orientador, Edson José Soares, por ter sido crucial no meu desenvolvimento acadêmico e no sucesso deste trabalho. Acima de tudo uma pessoa que sempre esteve presente me auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao meu professor, Bruno Venturini Loureiro, por me ajudar desde a minha formação na graduação e que foi o maior incentivador para eu alcançar essa conquista.

Agradeço aos professores por todo apoio prestado para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação. Em especial agradeço ao professor Rogério Ramos e ao professor David Fiorillo que sempre me ajudaram no desenvolvimento do experimento e que foi fundamental para que eu conseguisse concluir a tempo.

Agradeço à UCL por ser flexível com meu horário de trabalho, permitindo cursar as disciplinas do programa e a realização dos experimentos no Laboratório de Máquinas de Fluxo.

Agradeço aos meus queridos amigos Luila, Renata, Fabrício e Gustavo por sempre estarem presentes no desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

A redução do fator de atrito em escoamentos turbulentos, a partir da injeção de aditivos, vem sendo estudada desde meados do século passado e tem despertado amplo interesse científico e industrial até os dias atuais. Dentre os aditivos mais utilizados, destacam-se os poliméricos (poliacrilamida, poliisobutileno, goma xantana), aditivos do tipo surfactantes, fibras (nylon, algodão e asbeto), além de polpas de papel e bolhas de gás. A redução de arraste usando aditivos poliméricos é um fenômeno que foi reportado por Toms (1948). O autor mostrou que a adição de pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular em um escoamento turbulento reduzia significativamente o fator de atrito. Desde então o fenômeno tem sido extensivamente estudado, devido aos grandes benefícios atingidos em aplicações práticas em diversas áreas da engenharia. O exemplo mais famoso até os dias atuais é o transporte de petróleo bruto na "Trans-Alasca Pipe Line" com 1300 quilômetros de extensão, onde adicionado aditivo polimérico na ordem de ppm obtém-se redução de arraste da ordem de 30%. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o fenômeno de redução do fator de atrito em escoamentos turbulentos em tubos por adição de polímeros flexíveis. Usa-se uma bancada com controle de vazão, pressão e temperatura. Os resultados são focados na análise da degradação mecânica dos polímeros e sua relação com a concentração, peso molecular e número de Reynolds. Os resultados obtidos são ilustrados em termos do coeficiente de redução de arraste em função do número de passes, em que a quantidade de passes realizados na planta experimental representa um comprimento de tubulação da ordem de 400 metros.

Palavras-chave: polímeros; escoamento turbulento; redução de arraste; degradação polimérica.

# Abstract

The reduction of friction factor in turbulent flows, by additives injection, has been studied since the middle of the last century and has received wide scientific and industrial attention until now. Among the additives most used, polymers (Polyacrylamide, polyisobutylene, Xanthan Gum), surfactant additives, fiber (nylon, cotton and asbestos), besides of paper pulp and gas bubbles calls for attention. The drag reduction using polymeric additives is a phenomenon that was reported for first time by Toms (1948). The author showed that the addition of little quantities of high molar weight polymers in a turbulent flow, reduces the friction factor significantly. Since then the phenomenon has been widely studied, due to the big benefits achieved in practical applications in several engineering areas. The example most famous up to now is the transport of crude oil in the "Trans-Alasca Pipe Line" with 1300 kilometers of length where adding polymeric additives in the range of ppm lead to approximately 30% of drag reduction. The present work has the objective of assessing the phenomenon of friction factor reduction in turbulent pipe flows with addition of flexible polymers. For this project, it used an experimental turbulent pipe flow apparatus with control of flow rate, pressure and temperature. The results are focused in analyze of mechanical degradation of the polymers and its relation with the concentration, molecular weight and Reynolds number. The results are shown in terms of the drag reduction parameter in function of the number of passes, in which the equivalent length due all passes made in the experimental plant is about 400 meters.

Keywords: polymers; turbulent flow; drag reduction; polymer degradation.

# Lista de Figuras

1.1	Estações de bombeamento da Trans-Alaska Pipeline (PALIN) . . . . .	20
1.2	Fórmulas estruturais de polímeros redutores de arraste: (A) PEO, (B) PAM, (C) XG. . . . .	26
1.3	Trajatórias da redução de arraste por injeção de polímeros. . . . .	28
1.4	Desenho esquemático para ilustrar um passe. . . . .	30
2.1	Esquemático da bancada experimental. . . . .	32
2.2	Desenho esquemático da geometria rotativa formada por cilindros concêntricos com dupla folga. . . . .	35
2.3	Tempo necessário para difusão dos polímeros em água filtrada para peso molecular de $M_v = 4,0 \times 10^6$ . . . . .	36
2.4	Tempo necessário para difusão dos polímeros em água filtrada para peso molecular de $M_v = 5,0 \times 10^6$ . . . . .	36
2.5	Comparativo da análise da influência do meio externo. . . . .	37
2.6	Representação esquemática do problema. . . . .	39
2.7	Diagrama de causa e efeito para uma medida de pressão estática. . . . .	44
3.1	Gráfico da diferença de pressão. . . . .	48
3.2	Gráfico de vazão versus tempo. . . . .	49
3.3	Fator de atrito em função do número de Reynolds. . . . .	50
3.4	Redução de arraste DR, em função do número de passes Np. . . . .	51
3.5	Efeito da concentração na redução de arraste em função do número de passes para $M_v = 4,0 \times 10^6 g/mol$ . . . . .	52
3.6	Efeito da concentração na redução de arraste em função do número de passes para $M_v = 5,0 \times 10^6 g/mol$ . . . . .	53

3.7	Efeito da massa molecular na redução de arraste em função do número de passes.	54
3.8	Efeito da massa molecular na redução de arraste em função do número de passes.	55
3.9	Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes para $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ .	56
3.10	Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes para $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ .	57
3.11	Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes.	57
3.12	Avaliação da vazão em função do número de passes.	58
3.13	Efeito de queda de pressão em função do número de passes.	59
3.14	Efeito de concentração no Fator de Atrito de Fanning em função do número de Reynolds.	60
3.15	Efeito de massa molecular no Fator de Atrito de Fanning em função do número de Reynolds.	60



# Nomenclatura

UCL	Faculdade do Centro Leste
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
LFFT	Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes
PAM	poliacrilamida
PEO	óxido de polietileno
XG	goma xantana
$MDR$	máxima redução de arraste
$N_p$	número de passe
$c$	concentração polimérica (ppm)
$DR$	coeficiente de redução de arraste $\equiv DR = 1 - f/f_0$
$DR_{max}$	valor máximo do coeficiente de redução de arraste
$DR_{min}$	valor mínimo do coeficiente de redução de arraste
$DR'$	coeficiente de redução de arraste $\equiv DR'(N_p) = DR(N_p)/DR_{max}$
S	desvio padrão da amostra
N	número de amostras

$RDA$	redução de arraste
$AF$	água filtrada
$DR'_{ass}$	valor assintótico do coeficiente de redução de arraste relativo
$f$	fator de atrito de Fanning da solução
$f_0$	fator de atrito de Fanning do solvente
$M_v$	peso molecular viscosimétrico médio (Kg/mol)
$L$	comprimento do rotor
$a_{dg}$	distância do rotor ao fundo do copo (geometria de fenda dupla) (m)
$R_1$	raio interno do copo (geometria com fenda dupla) (m)
$R_2$	raio interno do rotor (geometria com fenda dupla) (m)
$R_3$	raio externo do rotor (geometria com fenda dupla) (m)
$R_4$	raio externo do copo (geometria com fenda dupla) (m)
$Re$	número de Reynolds $\equiv \frac{\rho \bar{V} D}{\eta(\gamma_c)}$
$T$	temperatura ( $^{\circ}C$ )
$X$	grau de polimerização
$D$	diâmetro do tubo
$Q$	vazão volumétrica
$\Delta_p$	variação de pressão
$\rho$	massa específica ( $kg/m^3$ )
$J$	variação da pressão por unidade de comprimento
$\eta$	rugosidade relativa do tubo
$\gamma_c$	Taxa de cisalhamento

$p_i$	pressão estática no ponto i
$p_{est}$	pressão estática
$p_m$	pressão estática média
$p_{ref}$	pressão de referência
$\bar{V}_i$	velocidade média no ponto i
$h_d$	perda de carga distribuída
$h_t$	perda de carga total
$h_1$	perda de carga localizada
$z_i$	coordenada no ponto i
$g$	gravidade local
$u_{pA}$	incerteza padrão das medidas tipo A
$u_{pB}$	incerteza combinada do tipo B
$u_{calib}$	incerteza da calibração
$u_{conv}$	incerteza da conversão
$u_p$	incerteza da pressão
$u_{pAm}$	incerteza do Tipo A para as medidas de pressão realizadas durante o testes
$u_{pAref}$	incerteza do Tipo A para as medidas de pressão de referência realizadas sem escoamento
$u_D$	incerteza da medida do diâmetro
$u_J$	incerteza da medida de variação de pressão
$u_Q$	incerteza da medida de vazão
$u_\rho$	incerteza da massa específica
$u_f$	incerteza da medida do fator de atrito

$k$	fator de abrangência
$U_p/\bar{p}$	incerteza expandida relativa da pressão
$UQ/\bar{q}$	incerteza expandida relativa da vazão
$x_0/D$	tomada de referência para medição de pressão diferencial

## Lista de Tabelas

2.1	Diâmetro médio da tubulação das tomadas de pressão. . . . .	33
2.2	Viscosidade cisalhante das soluções poliméricas. . . . .	38
2.3	Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido. . . . .	42
2.4	Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido. . . . .	43

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>19</b>
1.1 Motivação . . . . .	19
1.2 Revisão de Literatura . . . . .	23
1.3 Caracterização do problema . . . . .	29
<b>2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL</b>	<b>31</b>
2.1 Detalhamento da bancada experimental . . . . .	31
2.2 Preparo e caracterização das amostras . . . . .	33
2.3 Descrição dos experimentos . . . . .	37
2.4 Cálculo da perda de carga . . . . .	38
2.5 Critério de exclusão de dados e análise de incerteza . . . . .	41
<b>3 Resultados</b>	<b>47</b>
3.1 Validação da bancada experimental . . . . .	47
3.2 Resultados preliminares . . . . .	50
3.3 Efeito de concentração na redução de arraste . . . . .	51
3.4 Efeito da massa molecular na redução de arraste . . . . .	53
3.5 Efeitos de massa molecular e concentração no coeficiente de redução de arraste relativo . . . . .	55
3.6 Avaliação da concentração e massa molecular no fator de atrito de Fanning . . . . .	58

<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>61</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>ANEXO 1</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>ANEXO 2</b>	<b>75</b>

# Capítulo 1

## Introdução

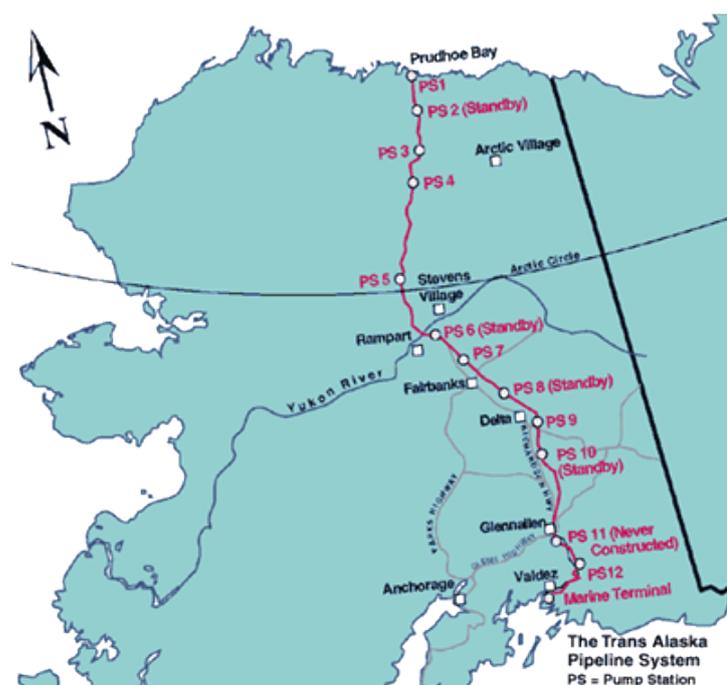
### 1.1 Motivação

A redução de arraste por injeção de aditivos vem sendo estudada há cerca de 65 anos desde que foi reportada pela primeira vez por Toms [1], quando foi observado que a adição de pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular em escoamentos turbulentos poderia provocar uma significativa redução do fator de atrito nas mesmas condições de escoamento. Embora Toms tenha sido o primeiro a descrever tal fenômeno, o uso da técnica já tinha sido aplicado na indústria de papel e celulose, onde as fibras em suspensão, principalmente as utilizadas em processos de fabricação de papel, provocavam o mesmo efeito, no entanto em concentrações maiores que aquelas descritas em 1948 por Toms. O sucesso desta técnica despertou o interesse de vários pesquisadores em diferentes setores industriais, devido aos grandes benefícios, tornando o campo de aplicação da técnica de redução de arraste por adição de aditivos amplo.

Pode-se considerar que a primeira aplicação da técnica de redução de arraste em larga escala em dutos de óleo bruto é o sistema que opera na "Trans-Alasca Pipe Line" cuja extensão é de aproximadamente 1300km com 12 unidades de bombeio. O sistema foi implantado em 1979. Segundo Burguer e Chorn [2], uma solução de polímero solúvel em óleo polimerizada a partir do monômero  $\alpha$ -olefina é injetado a jusante de cada estação de bombeamento com o intuito de aumentar a vazão a uma queda de pressão constante. Devido a eficiência da técnica de injeção de polímeros, não foi necessário construir mais estações de bombeamento. Desde 1979, os

polímeros utilizados nessa aplicação vem sofrendo modificações. Já é largamente sabido, por exemplo, que aumentando o peso molecular, menores concentrações de aditivos podem ser utilizadas para se ter a mesma eficiência na redução de arraste. Contudo, os polímeros são sensíveis aos mecanismos de degradação, sendo necessário projetar um sistema de injeção visando minimizar possíveis fontes de degradação mecânica. Atualmente a concentração de polímero na "Trans-Alasca Pipe Line" é da ordem de 10 ppm, que resulta no aumento de vazão em aproximadamente 33%. Em 1989, haviam muitas indústrias do mesmo seguimento utilizando essa técnica em dutos de óleos brutos "offshore" nos Estados Unidos e em muitos outros lugares do mundo, especialmente no estreito de Bass, na Austrália, nordeste da China, Assan e Bombaim na Índia, Oriente Médio e Mar do Norte segundo Motier e Carrier [3].

A redução de arraste é principalmente utilizada devido ao aumento da vazão a pressão constante, o que, conseqüentemente, possibilita o aumento na produção de óleo bruto. Além disso, outra vantagem na aplicação da técnica é a redução do resfriamento durante o transporte de óleo bruto, quando os polímeros são adicionados, pois a redução de arraste é acompanhada por uma redução da troca de calor. Dessa maneira a temperatura do óleo bruto se mantém elevada, favorecendo a baixa viscosidade e resultando em uma maior vazão a pressão constante. A Figura 1.1 mostra a extensão do oleoduto "Trans-Alasca Pipe Line" e as estações de bombeamento.



**Figura 1.1:** Estações de bombeamento da Trans-Alaska Pipeline (PALIN)

Hoje, a perfuração de poços de petróleo é capaz de atingir regiões de grande complexidade, com elevadas profundidades. Além disso, as perfurações, tanto "on-shore" quanto "off-shore" podem ser feitas em poços verticais ou horizontais de longo comprimento, e aquelas com janelas operacionais de pressão mais reduzidas, como as encontradas em perfurações de zonas de pré-sal, necessitam de tecnologias de redução de arraste por meio de adição de polímeros para auxiliar o processo dentro da janela operacional. A utilização de polímeros na redução de arraste deve levar em consideração as características do fluido de perfuração, a redução de arraste desejada e a degradação do polímero.

Além das aplicações mencionadas na indústria de óleo e gás, a redução de arraste por injeção de polímeros é muito usada em outras áreas da engenharia. A primeira aplicação da técnica em tubulações de drenagem de águas foi feito em 1969 no Texas pela Western Company com o objetivo de evitar enchentes após fortes chuvas. Foi utilizado uma solução de polímero com concentração de 500 ppm de poliacrilamida (PAM) e óxido de polietileno (PEO) e verificou-se o aumento da vazão entre 10 e 30%. Mais tarde Sellin [4] observou um aumento na vazão de 40% utilizando concentrações de polímeros menores que 100 ppm, melhorando o sistema de injeção.

Em circuitos de aquecimento de grandes sistemas, em circuitos de resfriamento na indústria química e em sistemas de ar condicionado de grandes edifícios, a energia de bombeamento pode ser reduzida através da adição de agentes de redução de arraste. Isto significa uma economia de energia significativa, porque as vazões nestas instalações são geralmente elevadas. Experimentos bem sucedidos que utilizaram polímeros em sistemas de aquecimento foram relatados por Arnbom & Hagstrand [5], Elperlin et al. [6], Leca & Leca [7] e Pollert et al. [8]. Todos estes experimentos reportaram significativa redução de arraste durante longos períodos de tempo. Outros tipos de aditivos, como surfactantes também podem ser utilizados para este tipo de aplicação. A primeira aplicação foi relatada por Povkh et al [9]. Em 1985, Orlendorf [10] acrescentou surfactantes em um pequeno sistema de aquecimento em Aachen, na Alemanha, e alcançou uma redução de arraste total de 57% neste sistema.

Gyr e Bewersdorff [11] relatam o uso da técnica de redução de arraste em cascos de navios e para corpos submersos, como submarinos, torpedos e foguetes de água. Até mesmo os nadadores usam essa técnica. Dois métodos principais de redução de arraste com aditivos foram testados: utilização de tintas contendo aditivos e injeção dos aditivos, principalmente de polímeros,

por meio de fendas e orifícios. Assim, se for considerado o uso de aditivos de redução de arraste durante a construção do navio, a potência do motor, que tem uma grande influência sobre os custos, pode ser reduzida. O transporte hidráulico de sólidos minerais em tubulações é economicamente atraente em comparação com o transporte por caminhão, trem ou navio. As mercadorias transportadas por longas distâncias são, principalmente, carvão e minério de ferro e o fluido transportador é a água. Uma vez que as tubulações mais longas para o transporte hidráulico são de aproximadamente 400 km de comprimento, a utilização de aditivos capazes de reduzirem o arraste é possível para uma economia de energia considerável. Pollert [12] [13] verificou que adicionando polímeros numa tubulação de 4,1 km de comprimento e de 250 mm de diâmetro, a velocidade e a concentração de sólidos poderiam ser aumentadas.

Fabula [14] e Figueredo e Sabadini [15] citam a utilização em sistemas de combate a incêndio para aumentar o alcance dos esguichos e para aumentar a vazão de água. O teste foi realizado por bombeiros nova-iorquinos utilizando o óxido de polietileno com concentração de 30 ppm. Redutores de arraste podem ser usados em seres vivos. Quando se pensa em aplicações biomédicas de redutores de arraste, imediatamente associa-se o seu uso com o aumento da circulação do sangue. Uma revisão das aplicações de redutores de arraste da circulação do sangue pode ser encontrado no trabalho de Greene et al. [16]. A redução de arraste pode ser observada naturalmente em alguns peixes que produzem substâncias que reduzem a fricção de seus corpos com a água e, portanto, permitem que nadem rapidamente, veja Kulicke et al.[17]. As técnicas de redução de arraste estão sendo muito estudadas em transportes aéreos e aquáticos Choi, et al. [18].

Ao investigar a literatura percebe-se que a redução do fator de atrito depende de variáveis que vão desde as características geométricas da tubulação até propriedades do fluido utilizado. Assim, pode-se verificar que as principais variáveis abordadas para o estudo da redução do fator de atrito são: tipo de polímero; concentração; diâmetro da tubulação e peso molecular. Além dos fatores já mencionados, outros fatores podem afetar o desempenho da redução de arraste, tais como: temperatura e salinidade. Embora o fenômeno de redução de arraste tenha sido estudado extensivamente, há pouca informação disponível sobre o efeito da temperatura e salinidade na redução de arraste. Um outro aspecto extremamente relevante é o fenômeno de degradação mecânica dos polímeros durante o escoamento.

O presente trabalho tem como objetivo investigar a redução de arraste em escoamentos tur-

bulentos por adição de polímeros flexíveis em uma planta experimental. Diversos parâmetros são investigados, usando-se o polímero óxido de Polietileno (*PEO*) como: número de Reynolds ( $Re$ ), concentração de polímero ( $c$ ) e massa molecular ( $M_v$ ). Aborda-se o problema no sentido de investigar cuidadosamente como estas variáveis afetam o mecanismo da degradação molecular que é fundamental para o desenvolvimento de materiais mais resistentes.

## 1.2 Revisão de Literatura

O fenômeno da redução de arraste em escoamentos turbulentos por injeção de polímeros tem chamado a atenção de diversos pesquisadores nos últimos 65 anos devido ao grande número de aplicações na indústria e em outras áreas da engenharia. Apesar de vários avanços alcançados, existem questões que não foram completamente respondidas, dentre eles, a interação do polímero e os vórtices causados pela turbulência.

Conforme discutido anteriormente, deve-se a Toms [1] o primeiro trabalho científico que reporta a redução de arraste por injeção de aditivos. Ele verificou que a adição de pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular com concentrações da ordem de ppm em escoamentos turbulentos poderia provocar uma significativa redução do fator de atrito nas mesmas condições de escoamento. O autor observa ainda que a redução de arraste é maior em maiores números de Reynolds e que o fenômeno está relacionado a escoamentos turbulentos. As forças envolvidas no escoamento em um tubo praticamente são duas: as forças normais que são aquelas que dirigem o escoamento e as forças tangenciais que retardam o escoamento devido a dissipação de energia do escoamento na forma de calor devido a viscosidade do fluido e conseqüentemente, consumindo energia. Acredita-se então que os polímeros minimizam essas forças tangenciais facilitando o escoamento. Com os resultados obtidos por Toms [1], os pesquisadores começaram a investigar o mecanismo de redução de arraste.

As teorias de redução de arraste são divididas em basicamente duas linhas: uma foi proposta por Lumley [19] baseado em efeitos viscosos. Esta linha de pensamento é seguida por vários outros pesquisadores, como Hinch [20], Ryskin [21], De Angelis et al. [22]. A outra linha foi proposta por Tabor e De Gennes [23] e se baseia em efeitos elásticos.

Lumley [19] define o termo "redução de arraste" como sendo a redução do fator de atrito

da solução aditivada em relação ao do solvente, medidos em um mesmo número de Reynolds. Dessa forma  $DR = 1 - f/f_0$ , onde  $f$  e  $f_0$  são, respectivamente, os fatores de atrito da solução e do solvente.

A teoria da cascata de Tabor e De Gennes [23] considera que o efeito do polímero é sentido apenas nas pequenas escalas do escoamento turbulento, onde a tensão do polímero se compara aos tensores de Reynolds. De acordo com o autor, a formação de novos vórtices nessas escalas, responsáveis pela dissipação de energia, é fortemente restringida, devido ao aumento do módulo elástico da solução. O estiramento das moléculas do polímero interrompem a cascata de Kolmogorov e o resultado líquido observado também é uma retração do domínio turbulento. De acordo com a teoria proposta, seria necessária uma concentração mínima para que o efeito elástico da adição do polímero no escoamento seja sentido. Na maioria dos casos essa concentração é muito pequena, entretanto, a existência de uma concentração mínima, revela uma significante diferença entre as teorias.

Existem outros autores que tentaram explicar o mecanismo de redução de arraste com um modelo de influência das macromoléculas na turbulência. Os primeiros trabalhos supuseram que a supressão da turbulência, causada por uma resistência as instabilidades do escoamento, era a causa do fenômeno. Savins [24] foi o primeiro a exibir um mecanismo deste tipo, levando em consideração que a energia cinética dos movimentos turbulentos era armazenada pelas macromoléculas causando uma supressão na turbulência tornando o coeficiente de atrito abaixo dos valores prenunciados. No entanto, um estudo proposto por Gadd [25] afirmava que não era possível admitir que as soluções contendo um agente redutor de arraste tenham a capacidade de opor resistência às instabilidades do escoamento, algumas dessas instabilidades poderiam ser até incentivadas pelo aditivo o que se chama de turbulência elástica.

Outro mecanismo estudado para explicar a redução de arraste foi a de que haveria uma redução na dissipação viscosa, e não uma supressão da turbulência, assim, os distúrbios que geram o movimento turbulento chegariam a acontecer, porém a sua difusão seria dificultada de alguma forma que todo o escoamento se tornasse turbulento. Então os pesquisadores relacionaram essa dificuldade de difusão dos distúrbios causados pela turbulência com as características das macromoléculas. Gordon [26] apresentou este tipo de mecanismo, porém Peterlin [27] tentou explicar o mecanismo onde ele baseava-se na hipótese de que o início da transição, no caso de fluidos que não apresentam redução de arraste, é acompanhado pelo desenvolvimento de ruptura

de certos vórtices resultantes de distúrbios amplificadas da camada limite, concluindo que os redutores de arraste por apresentarem características de cadeias longas, poderiam atravessar o centro dos vórtices enquanto a seção intermediária seria tensionada absorvendo a energia cinética do vórtice. Defendendo essa hipótese, Lacey [28] observou que se concentrasse as macromoléculas poliméricas no centro dos vórtices a viscosidade local elevaria e dissiparia a energia dos vórtices levando a uma redução de arraste.

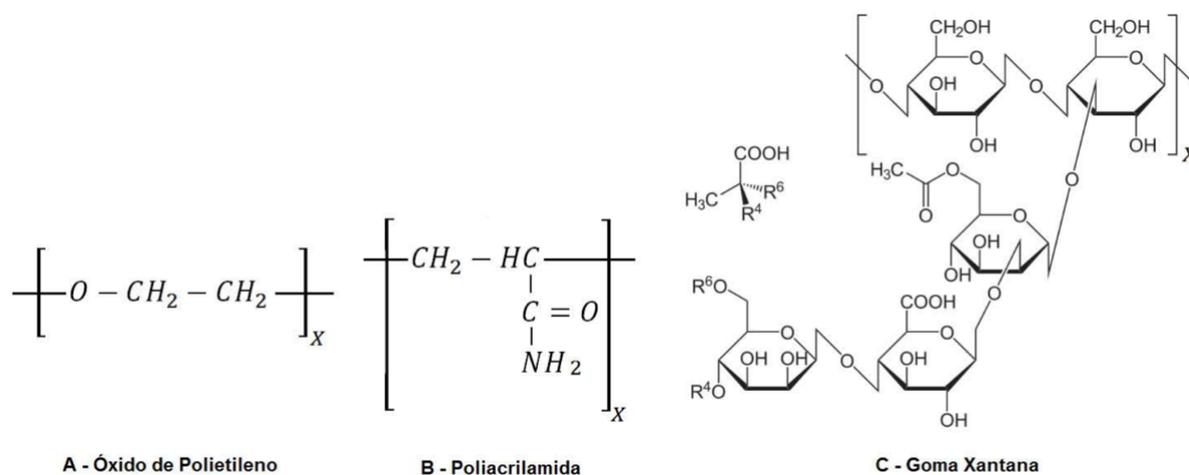
Gadd [29] [30] e Johnson e Barchi [31], mostraram que a causa da redução de arraste não era devido à dissipação da turbulência e sim a diminuição na geração da turbulência.

Savins [32] considerou que a redução de arraste estava associada a viscoelasticidade do fluido, sendo uma função da relação entre as forças elásticas e viscosas presente neste tipo de solução. Ele considerou que quando existia uma certa fração de um polímero de alto peso molecular, diluído a certas concentrações, era possível formar redes tridimensionais livres, porém, não foi possível avaliar algum trabalho que esclareça que a elasticidade seja resultante dessas redes, ou das macromoléculas individuais, ou ambas as estruturas.

Dubief et al. [33] apresentaram uma nova proposta do estudo do mecanismo de redução de arraste, onde foi avaliado a interação das moléculas de polímeros flexíveis com o escoamento turbulento. Segundo os autores, as moléculas do polímero, quando em solução escoando em regime turbulento, trabalham de forma organizada e cíclica armazenando energia dos vórtices e cedendo energia para o escoamento na direção do escoamento médio. A partir de resultados experimentais os autores acreditam que o polímero armazena a energia das flutuações nas direções transversais e cede energia para direção principal do escoamento médio.

Gyr e Bewersdorff [11] demonstraram o efeito de alguns tipos de aditivos que são utilizados na redução de arraste. Dentre os aditivos mais utilizados, destacam-se os poliméricos (poliacrilamida, poliisobutileno, óxido de polietileno, goma xantana), aditivos do tipo surfactantes, fibras (nylon, algodão e asbeto), além de polpas de papel e bolhas de gás. Para o presente trabalho o aditivo a ser utilizado é do tipo polimérico. De modo a melhorar o entendimento do fenômeno de redução de arraste utilizando polímeros, é necessário entender que para a formação de macro moléculas são necessários compostos de repetitivas pequenas unidades conhecidas como monômeros. Eles são unidos entre si por ligações químicas do tipo covalente. Em alguns casos, a repetição desses monômeros ocorrem de forma linear formando longas cadeias lineares. Em outros casos, as cadeias são ramificadas ou interconectadas para formar cadeias tridimensionais.

O número de unidades estruturais na cadeia é chamado de grau de polimerização. A Figura 1.2 mostra a unidade estrutural de alguns polímeros redutores de arraste onde o X indica o grau de polimerização ou número de unidades estruturais, reportado por Flory [34].



**Figura 1.2:** Fórmulas estruturais de polímeros redutores de arraste: (A) PEO, (B) PAM, (C) XG.

Os polímeros de baixo peso molecular são chamados de oligômeros ("oligomers", poucas partes), geralmente são produtos viscosos, de peso molecular da ordem de  $10^3$ . Os polímeros utilizados na redução de arraste geralmente possuem o peso molecular da ordem de  $10^6$ . O polímero utilizado nesse trabalho foi o óxido de etileno (*PEO*). Este polímero é descrito na literatura como redutor de arraste conforme Deshmukh e Singh [35], Bewersdorff e Singh [36], Sohn et al. [37].

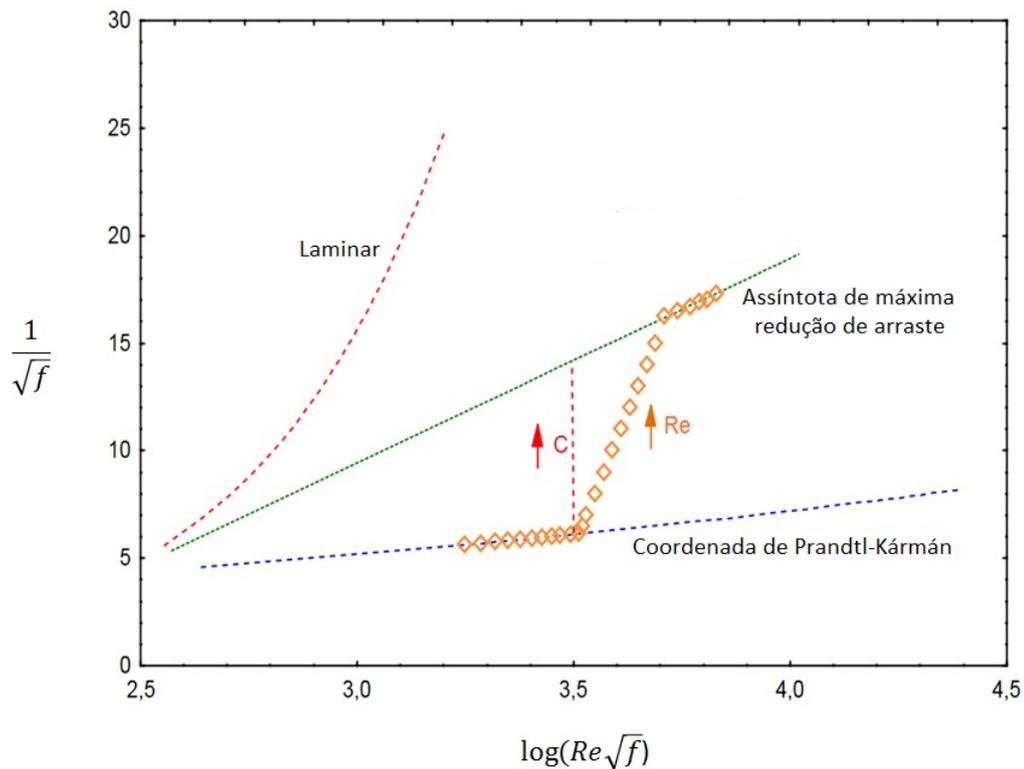
Alguns estudos sobre a aplicação de *PEO* para redução de arraste em dutos são encontrados na literatura. Scrivener e Kopp [38] fizeram um estudo baseado nas alterações da estrutura da turbulência quando era utilizado *PEO* 301. Eles utilizaram duas técnicas experimentais e apresentaram que o perfil de velocidade média do escoamento não era afetado em baixas concentrações de polímero da ordem de 5 ppm. Kulik [39] analisou a redução de arraste utilizando *PEO* com concentrações de 1 a 100 ppm em um tubo de diâmetro interno de dois milímetros e comprimento de quatro metros. O autor mostra que a redução de arraste depende fortemente do tempo. Esta dependência está ligada com interações do polímero com as estruturas turbulentas.

Uma questão que deve ser compreendida no estudo da redução de arraste, de grande importância, é a respeito da máxima redução de arraste, que foi demonstrado por Virk et al. [40] através de estudos experimentais com diferentes soluções poliméricas diluídas em escoamentos em dutos. Os autores observaram que quando o número de Reynolds era fixado e aumentava-se a concentração do aditivo polimérico, a redução de arraste tendia até um valor máximo, ( $MDR$ ), evidenciando que a partir deste momento a adição de maiores quantidades de polímero na solução não tinha mais influência na redução de arraste. A partir deste ponto a solução está saturada. A partir deste estudo os valores de  $MDR$  são determinados pela Assíntota de Máxima Redução de Arraste, conhecido na literatura em homenagem ao pesquisador de Assíntota de Virk ou Lei de Virk. A Figura 1.3 ilustra a assíntota de máxima redução de arraste em coordenadas de Prandtl-von Kármán. A máxima redução de arraste ainda não é totalmente compreendida, mas acredita-se que ela ocorra quando o efeito do polímero é sentido em todas as escalas do escoamento, causando uma mudança na região da camada limite e da região logarítmica do escoamento turbulento, onde é produzida uma grande quantidade de energia turbulenta, veja Virk [41], Sreenivasan e White [42].

Alguns pesquisadores acreditam que a máxima redução de arraste possivelmente ocorre quando os tensores de Reynolds são reduzidos drasticamente e os mecanismos que sustentam a turbulência são principalmente conduzidos pelas interações com os polímeros, veja Warholic et al. [43], Ptasiński et al. [44] e Min et al. [45].

Outro aspecto muito importante sobre o assunto é o mecanismo de degradação do polímero. A maior parte das soluções poliméricas eficientes na redução de arraste podem perder sua eficiência quando submetidas ao cisalhamento intenso e contínuo White [46]. Os autores acreditam que a perda de eficiência seja consequência da cisão permanente das longas cadeias macromoleculares, que se transformam em cadeias menores e menos eficientes na redução do arraste. Uma diminuição na viscosidade da solução acompanha a queda na eficiência de redução de arraste causada pela degradação mecânica. Essa diminuição na viscosidade sugere que o soluto reduz o seu peso molecular o que poderia confirmar a hipótese da ruptura das cadeias poliméricas reportado por Gadd [25].

Amar e Swaidan [47] fizeram testes com soluções diluídas de óxido de polietileno em um sistema com recirculação e verificaram que a degradação tornava-se mais severa a medida em que a vazão aumentava.



**Figura 1.3:** Trajetórias da redução de arraste por injeção de polímeros.

Ting e Nadolink [48] verificaram a capacidade de redução de arraste de soluções diluídas de óxido de polietileno (PEO) e poliácridamida (PAM). Soluções estoque foram preparadas e armazenadas a fim de verificar se o tempo de armazenamento influenciava no desempenho do polímero. As concentrações das soluções analisadas foram 10, 25, 50 e 100 ppm. Uma amostra diária era retirada e testada. Os autores concluíram que a eficiência do aditivo com passar do tempo apresentava o mesmo pico de redução de arraste, porém, o envelhecimento da solução diminui a capacidade de resistir à degradação mecânica. Vários autores verificaram os efeitos de concentração, número de Reynolds e peso molecular na degradação de soluções de óxido de polietileno. Segundo os autores, o aumento da concentração e do peso molecular retardam o processo de degradação, veja Paterson e Abernathy [49], Pereira e Soares [54], Pereira et al. [55].

Experimentos apresentados por Solomon et al. [50] procuraram mensurar o quanto a molécula do polímero tende a se romper quando a solução é submetida a escoar por um circuito de tubulação diversas vezes. Notou-se que com o aumento do número de passes da solução no circuito de tubulação a degradação do polímero aumenta. Caso o número de Reynolds do es-

coamento seja mantido é possível identificar que após vários passes a degradação do polímero tende a cessar e o peso molecular do polímero se estabiliza em um certo valor, nomeado de peso molecular crítico. O autor acredita que, devido à degradação das moléculas do polímero, chega um momento em que o número de moléculas não degradadas não é mais suficiente para manter a máxima redução de arraste, então a redução de arraste tende a reduzir e se estabilizar em um valor mínimo, se as condições do escoamento não mudarem.

Experimentos apresentados por Choi et al. [51], Nakken et al. [52], Vanapalli et al. [53], Pereira e Soares [54], Pereira et al. [55] mostraram que fixando o número de Reynolds do escoamento, após um longo período de tempo, a redução de arraste tende a um regime permanente, a partir do qual nenhuma degradação adicional é observada. Acredita-se que a redução de arraste é fortemente afetada pela concentração de moléculas e pelo peso molecular embora a diminuição da redução de arraste nem sempre se correlaciona com a perda de peso molecular do polímero conforme apresentado por Matthew W. Liberatore [56]. O comportamento das soluções poliméricas variam com a concentração de polímero.

Apesar dos vários estudos relacionados a redução de arraste usando aditivos poliméricos em um escoamento, muitos aspectos do problema são insuficientemente avaliados. Este trabalho visa contribuir com o estudo experimental dos efeitos do número de Reynolds, peso molecular e concentração avaliando a degradação polimérica a partir do escoamento da solução em um duto. A redução de arraste é medida em função do número de passes na tubulação. A influência dos parâmetros na degradação é destacada e é a principal motivação deste trabalho.

### **1.3 Caracterização do problema**

O presente trabalho estuda experimentalmente a redução de arraste por adição de um polímero de alto peso molecular em escoamentos turbulentos. Os experimentos são realizados em uma planta experimental montada no Laboratório de Máquinas de Fluxos na Universidade Federal do Espírito Santo. Investiga-se a redução de arraste para o Óxido de Polietileno em diferentes concentrações e pesos moleculares.

Os níveis de redução de arraste são avaliados em função do número de passes ( $N_p$ ). Um passe é determinado a partir do escoamento de todo o fluido contido no vaso de pressão até o reser-

vatório 2, conforme a Figura 1.4. Para o presente trabalho são realizados 40 passes caracterizando um comprimento de tubulação de aproximadamente 500 metros.



**Figura 1.4:** Desenho esquemático para ilustrar um passe.

O coeficiente de redução de arraste,  $DR$ , é definido como  $DR = 1 - f/f_0$ , em que  $f$  e  $f_0$  representam o fator de atrito de Fanning da solução polimérica e do solvente, respectivamente. A degradação polimérica é avaliada por meio do coeficiente de redução de arraste  $DR$  e através do coeficiente de redução de arraste relativo,  $DR'$ , definido como  $DR' = DR(N_P)/DR_{max}$ , onde  $DR_{max}$  representa a máxima redução de arraste observada durante o experimento.

## Capítulo 2

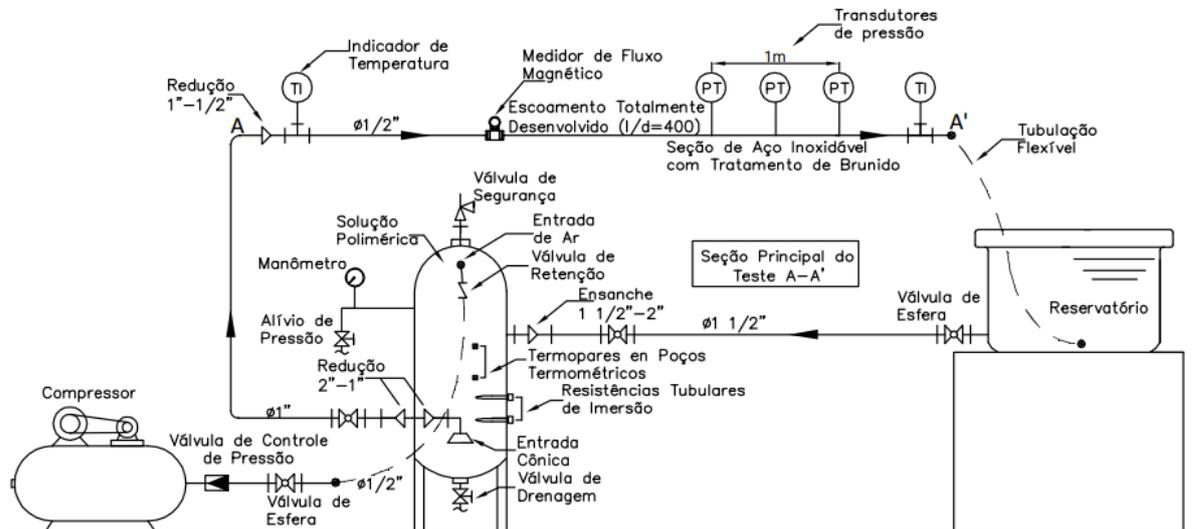
# ABORDAGEM EXPERIMENTAL

### 2.1 Detalhamento da bancada experimental

Na literatura, poucos são os trabalhos experimentais sobre redução de arraste por aditivos que informam detalhes técnicos das bancadas utilizadas. De modo geral, a prática experimental é bem descrita, no entanto informações relacionadas aos tipos de medidores utilizados e o método de aquisição não são disponibilizadas. A análise da redução de arraste em dutos é reportado por vários autores Paterson [49], Merril [57], Moussa [58], Vanapali et al. [53] e Hadri [59], porém os trabalhos que analisam a degradação do aditivo em função do número de passes carecem de uma análise criteriosa a respeito da importância da concentração do polímero, peso molecular e uma quantidade significativa de número de passes. Vale ressaltar que trabalhos experimentais que avaliam a redução de arraste utilizando uma bancada experimental exigem grandes instalações laboratoriais, elevado tempo de teste, além de um volume relativamente grande de amostras. A Figura 2.1 mostra o esquema da bancada.

A montagem experimental para determinação do fator de atrito consiste de uma bancada que pode ser operada em circuito aberto ou fechado, dependendo do teste que se deseja realizar (relação entre número de passes e degradação do aditivo ou o tempo de escoamento e degradação do aditivo, respectivamente). O escoamento pode ser mantido pela bomba centrífuga ou por ar comprimido alimentado pelo compressor. Entre os principais elementos que constituem a bancada experimental encontra-se: uma bomba centrífuga, um inversor de frequência,

um compressor, um vaso de pressão, um medidor de vazão magnético e três transdutores de pressão estáticos detalhados no anexo 1.



**Figura 2.1:** Esquemático da bancada experimental.

A bancada é constituída basicamente por trechos de tubos de aço galvanizado de 16,35 milímetros de diâmetro interno ligados em série e isolados termicamente, sendo que para a região de tomadas de pressão, um trecho constante de tubo com 1400 milímetros de comprimento de aço inoxidável foi utilizado. Este tubo foi projetado e fornecido pelo LFFT - Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes da UCL - Faculdade do Centro Leste. Para garantir a medida do diâmetro interno foi executado o serviço de brunimento na tubulação para tornar este valor constante e conhecido. O diâmetro interno do tubo da tomada de pressão foi medido no Laboratório de Metrologia do IFES – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – por meio de micrômetro interno (Fur-o-test) em três pontos distintos para cada extremidade. O resultado é apresentado na Tabela 2.1.

O comprimento do trecho a montante das tomadas de pressão é suficiente para garantir um escoamento inteiramente desenvolvido na região de medição de perda de carga assim como para medição de vazão. Toda montagem das tubulações foi feita por meio de flanges para garantir a intercambialidade.

O experimento é controlado por meio de um supervisor desenvolvido sob a plataforma Lab-View. A tela do supervisor se encontra no anexo 2. Os sinais de pressão e vazão são adquiridos

por uma placa de aquisição de dados *NI – 6008* e armazenados no banco de dados do LabView, de onde podem ser extraídos os dados necessários no momento exato do teste. Já os sinais de temperatura, que são medidos dentro do vaso de pressão e no início e fim da seção de testes, são adquiridos por um módulo de entrada analógica para termopar *NI – 9211* e também são armazenados no banco de dados do LabView.

**Tabela 2.1:** Diâmetro médio da tubulação das tomadas de pressão.

Diâmetro nominal		Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 3 (mm)	Média (mm)
½"	Extr. 01	16.446	16.447	16.449	16.454
	Extr. 02	16.453	16.464	16.468	

O supervisor conta com algoritmos de controle multivariável para estabilizar a vazão nos estados que são efetuados os testes. O controle das variáveis auxilia na redução de incertezas experimentais. O controle pode ser dado em função da rotação da bomba, vazão volumétrica ou pelo número de Reynolds. Porém, vale ressaltar que o controle feito em função da rotação da bomba se dá de forma mais rápida do que pela vazão ou número de Reynolds, sendo assim, mais vantajosa quando se deseja utilizar a mesma amostra para avaliar diferentes vazões.

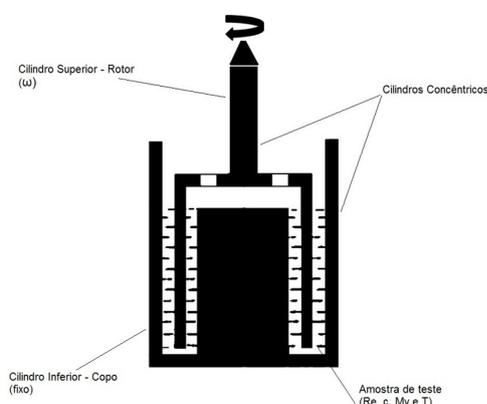
## 2.2 Preparo e caracterização das amostras

Conforme citado anteriormente o polímero utilizado neste trabalho é o óxido de polietileno. Incomum aos outros polímeros, o PEO é encontrado com uma grande extensão de massas moleculares (de oligômeros até massa moleculares da ordem de milhões). O polímero é cristalino, não-iônico, termoplástico e possui fórmula geral  $H(-O - CH_2 - CH_2 -)_nOH$ , veja Bailey e Koleske [60], Devanand e Selser [61]. Por possuir unidade hidrofóbica (etileno) e hidrofílica (oxigênio) em sua estrutura química, o PEO tem algumas características peculiares como ser solúvel em uma ampla variedade de solventes orgânicos e em água, Kjellander e Florin [62], Crupi et al. [63] e tendência a formar uma monocamada na interface, Glass [64]. Para o presente trabalho o aditivo foi fornecido pela Sigma-Aldrich. Soluções de óxido de polietileno com duas diferentes massas moleculares são empregadas:  $(M_{v1}) = 4,0 \times 10^6 g/mol$ , e  $(M_{v2}) = 5,0$

$\times 10^6 g/mol$ . Pereira e Soares [54] utilizaram o mesmo aditivo em seu trabalho e para avaliar o peso molecular fornecido pelo fabricante, os autores utilizaram o procedimento descrito por Flory [34], concluindo que os valores do peso molecular fornecidos pelo fabricante estavam corretos.

As soluções poliméricas foram preparadas de acordo com uma adaptação do procedimento sugerido por Little e Wiegard [65]. O polímero foi pesado em uma balança analítica e após determinada a quantidade de aditivo, era vertido cuidadosamente sobre a superfície de água deionizada. A solução então foi lacrada e mantida a uma temperatura de aproximadamente  $20^\circ\text{C}$  e deixada em repouso por 96 horas para que o polímero pudesse intumescer. Após a difusão da solução estoque de 1000 ppm, as amostras foram diluídas em 3 recipientes de 50 litros contendo água filtrada (AF) totalizando 150 litros de solução. Para a completa difusão nos recipientes, foi necessário aguardar 72 horas para garantir que a solução estava homogênea, completando assim 168 horas de diluição antes de cada teste. Para validar o procedimento descrito para a difusão das amostras, um conjunto de testes foi realizado com o intuito de observar o efeito de agentes externos na solução, como por exemplo bactérias. Com este objetivo, preparou-se soluções com água filtrada e água deionizada para dois pesos moleculares de PEO,  $(M_v) = 4,0 \times 10^6 g/mol$ , e  $(M_v) = 5,0 \times 10^6 g/mol$ . Para o polímero de peso molecular de  $(M_v) = 5,0 \times 10^6 g/mol$  foram preparadas amostras que ficaram estocadas de diferentes formas. Uma amostra ficou completamente vedada e a outra ficou exposta ao ambiente, com a finalidade de se fazer uma análise sobre a influência do ambiente na solução ao longo do tempo. Os testes foram obtidos através de um reômetro modelo Anton Paar MCR 501, utilizando uma geometria rotativa formada por cilindros concêntricos com dupla folga "Standard Double Gap", semelhante a utilizada por Pereira e Soares [54], por Nakken et al. [52] e Bizotto e Sabadini [66]. Devido a sua grande área de contato, é possível obter resultados com boa precisão. A Figura 2.2 ilustra a geometria utilizada.

Na geometria formada por cilindros concêntricos com dupla folga, a amostra é depositada entre duas superfícies rígidas, coaxiais e interconectadas, com simetria cilíndrica (copo). O rotor, um tubo de paredes finas e coaxiais localizado entre as duas superfícies cilíndricas mencionadas, pode girar em torno do eixo de simetria do copo com uma determinada velocidade angular. Os raios,  $R_1 = 19,74 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 20,25 \text{ mm}$ ,  $R_3 = 21,00 \text{ mm}$ , e  $R_4 = 21,50 \text{ mm}$ , o comprimento do rotor,  $L = 78,70 \text{ mm}$ , e a distância do rotor ao fundo do copo,  $a_{dg} = 2,30 \text{ mm}$ . O volume total de amostra no interior do copo é de 12,00 ml.

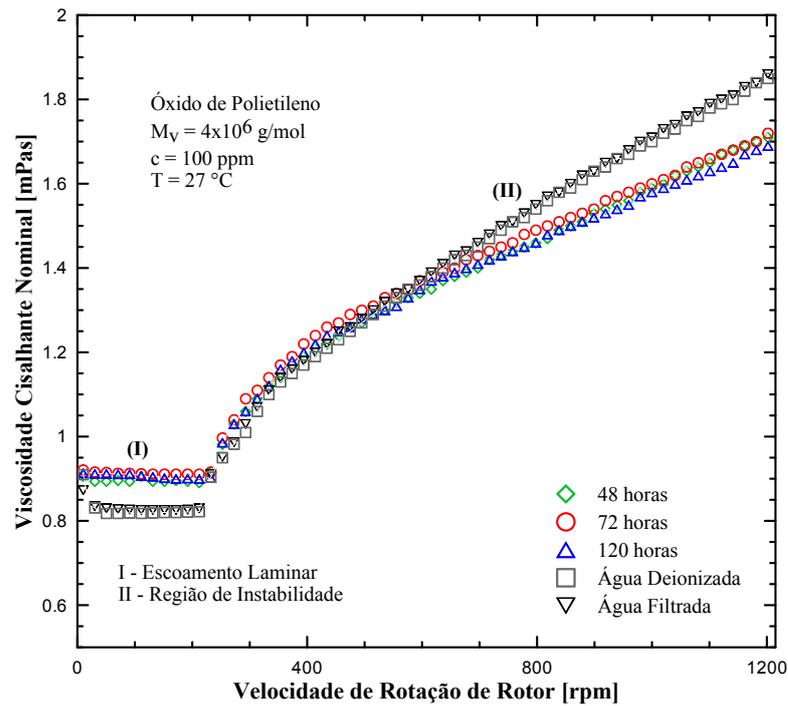


**Figura 2.2:** Desenho esquemático da geometria rotativa formada por cilindros concêntricos com dupla folga.

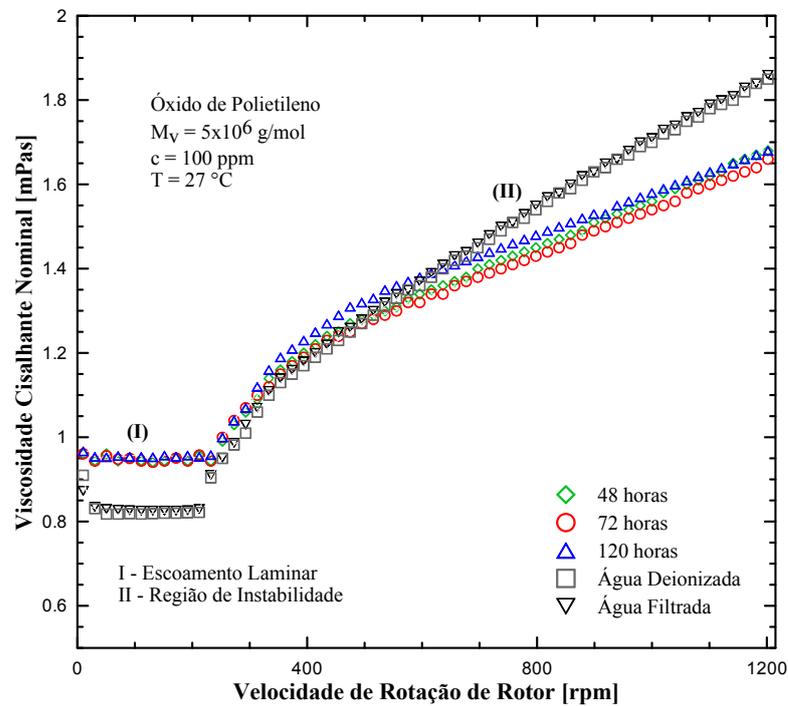
Para a realização dos testes imprime-se uma aceleração constante ao rotor do reômetro para que a rotação varie de 0 a 1200 rpm em 1200 segundos. Cento e vinte pontos são aquisitados (um ponto a cada dez segundos).

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram o efeito do tempo de armazenamento da solução estoque na capacidade de promover a redução de arraste em regime turbulento para soluções preparadas com PEO. Uma quantidade de amostra foi retirada da solução estoque em 48, 72 e 120 horas depois do término da preparação das referidas soluções. Percebe-se que o correto armazenamento da solução estoque em um recipiente hermético garante a qualidade da solução.

A Figura 2.5 compara as amostras de PEO de  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  que foram estocadas de maneiras diferentes. É possível observar que a amostra que sofreu ação do meio externo perdeu a eficiência na redução de arraste em 48 horas e que a viscosidade da amostra aberta caiu em relação a amostra que estava lacrada. Os resultados observados condizem com os encontrados por Wyatt et al. [67], em que mostram a importância das diferentes condições de diluição de polímeros em relação à redução de arraste em escoamento turbulento, destacando que o preparo das soluções de estoque é essencial para otimizar a concentração do polímero e a *RDA*.



**Figura 2.3:** Tempo necessário para difusão dos polímeros em água filtrada para peso molecular de  $M_v = 4,0 \times 10^6$ .



**Figura 2.4:** Tempo necessário para difusão dos polímeros em água filtrada para peso molecular de  $M_v = 5,0 \times 10^6$ .

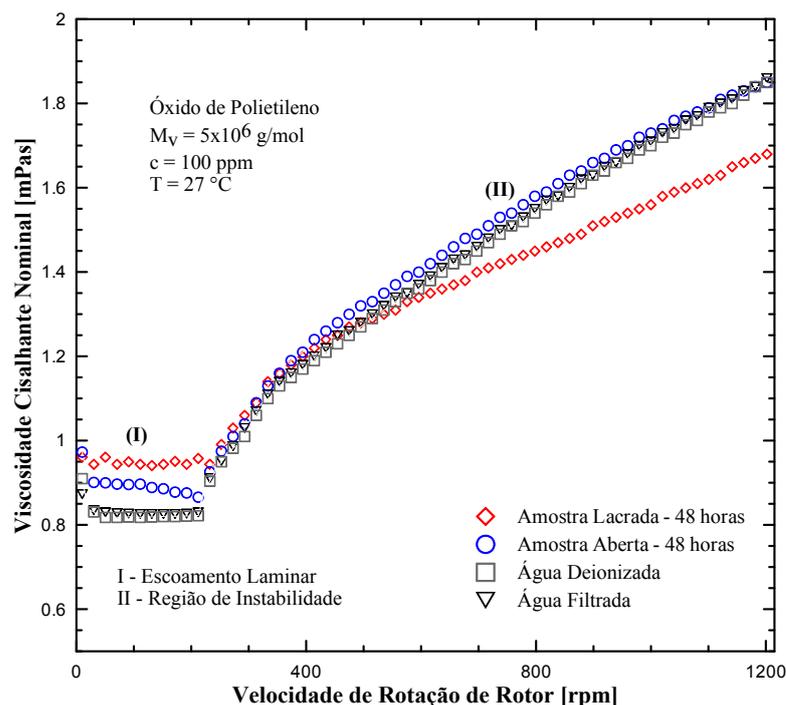


Figura 2.5: Comparativo da análise da influência do meio externo.

## 2.3 Descrição dos experimentos

Os testes foram realizados com o polímero óxido de polietileno com diferentes pesos moleculares diluídos em água filtrada. Após a preparação da solução, as propriedades de massa específica e curva reológica foram obtidas. A massa específica foi obtida por meio do método de picnometria a  $27^\circ\text{C}$  em um picnômetro calibrado e a reologia em um reômetro AntonPaar Physica MCR 501 utilizando geometria "Double gap C-DG26.7" conforme apresentado anteriormente. A Tabela 2.2 mostra os valores da viscosidade cisalhante utilizadas nos cálculos de  $R_e$ , em função  $c$  e  $M_v$ , onde a temperatura dos testes foram realizados à  $27^\circ\text{C}$ .

Após a caracterização do fluido a solução é vertida no vaso de pressão e o escoamento é mantido por ar comprimido alimentado por um compressor que possui pulmão totalmente vedado e é pressurizado com auxílio de uma válvula reguladora de pressão. O teste é realizado mantendo a pressão constante no compressor. A cada passe pela bancada, a solução deixa o vaso de pressão e é encaminhada para um reservatório secundário localizado no final da seção de teste. Assim que toda a solução que estava no vaso de pressão passa pela seção de teste e chega ao reservatório, o vaso de pressão é despressurizado e a solução retorna para ele. O reservatório é ligado ao vaso de pressão por uma tubulação de 1,5 polegadas (diâmetro maior que a seção de

teste) pela qual a solução pode retornar ao vaso movido pela força de gravidade para diminuir os efeitos da degradação.

**Tabela 2.2:** Viscosidade cisalhante das soluções poliméricas.

$M_v$ [g/mol]	$c$ [ppm]	$\eta$ [mPa.s]
$4,0 \times 10^6$	25	0,872
$4,0 \times 10^6$	50	0,901
$4,0 \times 10^6$	75	0,924
$4,0 \times 10^6$	100	0,957
$5,0 \times 10^6$	25	0,874
$5,0 \times 10^6$	50	0,905
$5,0 \times 10^6$	75	0,938
$5,0 \times 10^6$	100	0,964

Sucessivos passes são realizados, podendo assim, ser analisado o aumento do fator de atrito devido à degradação polimérica à medida que a solução é submetida ao escoamento na seção de testes. Cabe ressaltar, que o tempo necessário para a solução ser pressurizada no vaso de pressão, ser submetida ao escoamento até o tanque secundário e assim retornar por gravidade até ao vaso de pressão novamente é de aproximadamente 15 minutos.

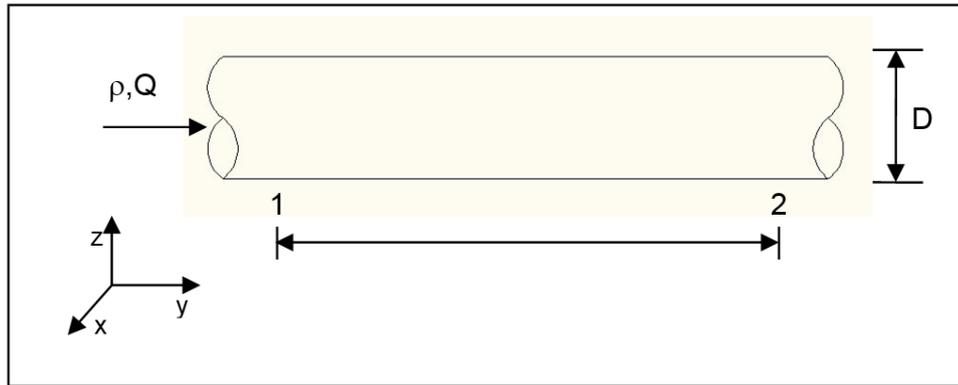
## 2.4 Cálculo da perda de carga

O escoamento de um fluido com massa específica  $\rho$ , viscosidade  $n$ , submetido entre os pontos 1 e 2 de um tubo circular com diâmetro  $D$ , vazão volumétrica  $Q$ , e diferença de pressão entre os pontos mencionados igual a  $\Delta p = p_2 - p_1$  é ilustrado na Figura 2.6.

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

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2}{2} + gz_2 \right) = h_t \quad (2.1)$$

Em que  $p_1$  e  $p_2$  são as pressões estáticas nos pontos 1 e 2, respectivamente;  $\bar{V}_1$  e  $\bar{V}_2$  são as



**Figura 2.6:** Representação esquemática do problema.

velocidades médias nos pontos 1 e 2, respectivamente;  $g$  é a aceleração local da gravidade;  $z_1$  e  $z_2$  são as coordenadas verticais dos pontos 1 e 2, respectivamente; e  $h_t$  é a perda de carga total.

A perda de carga total,  $h_t$ , é considerada como a soma das perdas distribuídas,  $h_d$ , devido aos efeitos de atrito no escoamento desenvolvido em tubos de seção constante, com perdas de carga localizadas,  $h_l$ , devido às entradas, saídas, acessórios, mudanças de área, etc. Considerando que não há nenhum acessório entre os pontos 1 e 2, pode-se desconsiderar a perda de carga localizada. Assim, a perda de carga total engloba apenas as perdas distribuídas geradas pelo atrito existente entre o fluido e o tubo. Ao considerar que o tubo é horizontal e de área constante, as velocidades médias nos pontos 1 e 2 ( $\bar{V}_1$  e  $\bar{V}_2$ ) são igualadas, assim como as coordenadas dos pontos 1 e 2 ( $z_1 = z_2$ ). Logo, a Equação (2.1) se resume a Equação (2.2) mostrada abaixo:

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

No escoamento turbulento inteiramente desenvolvido, a queda de pressão devido ao atrito, num tubo horizontal de área constante, depende do diâmetro do tubo,  $D$ , do seu comprimento,  $L$ , da sua rugosidade,  $e$ , da velocidade média de escoamento,  $\bar{V}$ , da massa específica,  $\rho$ , e da viscosidade,  $\eta$ , do fluido conforme a Equação (2.3):

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

Ao aplicar a análise dimensional, a relação entre os parâmetros pode ser demonstrada na Equação(2.4):

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

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

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

Ou em termos de vazão volumétrica demonstrado na Equação (2.6):

$$f = \frac{D^5(\Delta p/L)\pi^2}{8\rho Q^2} \quad (2.6)$$

Em que  $Re$  para um caso geral e  $\varepsilon$  são definidos a partir das Equações (2.7) e (2.8) respectivamente:

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \quad (2.7)$$

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\eta(\gamma_c)} \quad (2.8)$$

Onde  $\eta$  é a viscosidade de um fluido newtoniano generalizado e  $\gamma_c$  é a taxa de cisalhamento característica. O fator de atrito para um escoamento turbulento de fluidos newtonianos pode ser calculado utilizando correlações experimentais. Para o presente trabalho foi utilizada a correlação de Blasius representada pela Equação (2.9),

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (2.9)$$

A máxima redução do fator de atrito, provocada pela adição de pequenas quantidades de polímeros, pode ser dada pela equação do fator de atrito proposta por Virk [41] representada pela Equação (2.10).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9,5 \log \left( \frac{Re\sqrt{f}}{2} \right) - 16,2 \quad (2.10)$$

Para o cálculo da redução de arraste é utilizado a Equação (2.11), proposta por Lumley [19].

$$DR = 1 - \frac{f}{f_0} \quad (2.11)$$

## 2.5 Critério de exclusão de dados e análise de incerteza

Conforme descrito anteriormente, as variáveis de pressão e vazão são obtidas por uma placa da National Instruments NI-6008. Os dados aqisitados no processo são guardados em um banco de dados desenvolvido na plataforma NI-Max. Vale ressaltar que a partir do momento em que o sistema de supervisão entra em funcionamento, a aquisição das variáveis é feita em tempo real. Para cada passe realizado no experimento, 120 dados são obtidos em um intervalo de tempo de 60 segundos para cada variável do teste. Os dados adquiridos são comparados ao critério estatístico de Chauvenet para exclusão de dados. A Tabela 2.3 lista os valores estabelecidos pelo critério onde a razão entre o desvio máximo e o desvio padrão são demonstrados para alguns números de amostras. Neste trabalho foi utilizado a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão da ordem de 2,81 onde valores maiores são excluídos.

Para eliminar pontos de dados duvidosos, primeiro calcula-se a média (ou o valor médio) e o desvio padrão usando todos os pontos de dados. Os desvios de cada ponto são então comparados com o desvio padrão de acordo com a informação da Tabela 2.3 ( ou pela aplicação direta do critério), e os pontos duvidosos são eliminados. Para a apresentação final dos dados, uma nova média e desvio padrão são computados com a eliminação dos dados espúrios.

Para demonstrar a utilização do método, foram realizadas 40 amostras de leituras obtidas com os transdutores de pressão em um teste realizado com água conforme a Tabela 2.4. Neste exemplo

demonstra-se a exclusão de dados espúrios que estão fora do limite do critério.

**Tabela 2.3:** Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.

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

Para esta demonstração foi escolhida a razão entre o desvio máximo e o desvio padrão de 2,33 o que representa uma quantidade de 25 amostras. Após a aplicação do critério de Chauvenet sobre os dados de pressão e vazão, foi realizado o cálculo da incerteza combinada para estas variáveis. A seguir, é apresentado o procedimento para a obtenção da incerteza expandida para a pressão. A Equação (2.12) é utilizada para determinar a pressão estática em uma tomada de pressão na tubulação de teste, que servirá para desenvolver a equação de incerteza combinada para esta variável.

$$P = \overline{P}_m - \overline{P}_0 \quad (2.12)$$

Em que  $P_m$  é a pressão média obtida na tomada de pressão durante a realização do teste conforme a Equação (2.13), e  $P_0$  é a pressão estática média de referência obtida na mesma tomada de pressão sem escoamento na tubulação de teste, conforme a Equação (2.14)

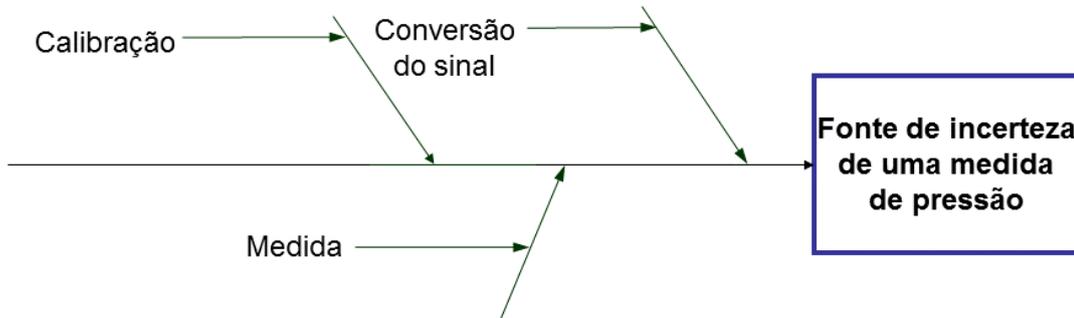
$$\overline{P}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_m i \quad (2.13)$$

$$\overline{P}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_0 i \quad (2.14)$$

**Tabela 2.4:** Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido.

Amostra	Valores originais			Valor Crítico de Chauvenet			Valores expurgados		
	PT-01	PT-02	PT-02	PT-01	PT-02	PT-03	PT-01	PT-02	PT-03
1	58.985,30	56.852,32	47.586,00	0,07	0,91	1,01	58985,3	56852,32	48654,8
2	62.287,90	59.828,53	49.528,23	<b>3,36</b>	<b>3,21</b>	<b>3,47</b>			
3	61.787,90	59.325,30	50.254,30	<b>2,86</b>	<b>2,82</b>	<b>4,39</b>			
4	61.287,90	59.025,20	47.112,25	<b>2,36</b>	<b>2,59</b>	0,41			47112,25
5	61.887,90	59.225,20	47.052,00	<b>2,96</b>	<b>2,75</b>	0,34			47052,00
6	58.703,40	55.522,90	46.839,20	-0,22	-0,12	0,07	58703,4	55522,9	46839,20
7	58.703,40	55.522,90	46.839,20	-0,22	-0,12	0,07	58703,4	55522,9	46839,20
8	58.703,40	55.522,90	46.839,20	-0,22	-0,12	0,07	58703,4	55522,9	46839,20
9	58.658	55.121	46.558,50	-0,26	-0,44	-0,29	58658	55121	46558,50
10	58.658	55.121	46.558,50	-0,26	-0,44	-0,29	58658	55121	46558,50
11	58.953,50	55.583,50	46.968,10	0,03	-0,08	0,23	58953,5	55583,5	46968,10
12	58.953,50	55.583,50	46.968,10	0,03	-0,08	0,23	58953,5	55583,5	46968,10
13	58.862,60	55.742,80	47.112,30	-0,06	0,05	0,41	58862,6	55742,8	47112,30
14	58.862,60	55.742,80	47.112,30	-0,06	0,05	0,41	58862,6	55742,8	47112,30
15	58.862,60	55.742,80	47.112,30	-0,06	0,05	0,41	58862,6	55742,8	47112,30
16	58.748,90	55.287,80	46.642	-0,17	-0,31	-0,18	58748,9	55287,8	46642,00
17	58.748,90	55.287,80	46.642	-0,17	-0,31	-0,18	58748,9	55287,8	46642,00
18	58.582,20	55.136,20	46.384,10	-0,34	-0,42	-0,51	58582,2	55136,2	46384,10
19	58.582,20	55.136,20	46.384,10	-0,34	-0,42	-0,51	58582,2	55136,2	46384,10
20	58.582,20	55.136,20	46.384,10	-0,34	-0,42	-0,51	58582,2	55136,2	46384,10
21	58.748,90	55.234,80	46.467,50	-0,17	-0,35	-0,40	58748,9	55234,8	46467,50
22	58.748,90	55.234,80	46.467,50	-0,17	-0,35	-0,40	58748,9	55234,8	46467,50
23	58.294,20	54.886	46.255,10	-0,62	-0,62	-0,67	58294,2	54886	46255,10
24	58.294,20	54.886	46.255,10	-0,62	-0,62	-0,67	58294,2	54886	46255,10
25	58.294,20	54.886	46.255,10	-0,62	-0,62	-0,67	58294,2	54886	46255,10
26	58.415,40	54.954,20	46.475,10	-0,50	-0,56	-0,39	58415,4	54954,2	46475,10
27	58.415,40	54.954,20	46.475,10	-0,50	-0,56	-0,39	58415,4	54954,2	46475,10
28	58.711	55.348,50	46.626,80	-0,21	-0,26	-0,20	58711	55348,5	46626,80
29	58.711	55.348,50	46.626,80	-0,21	-0,26	-0,20	58711	55348,5	46626,80
30	58.711	55.348,50	46.626,80	-0,21	-0,26	-0,20	58711	55348,5	46626,80
31	58.309,30	55.143,80	46.543,40	-0,61	-0,42	-0,31	58309,3	55143,8	46543,40
32	58.309,30	55.143,80	46.543,40	-0,61	-0,42	-0,31	58309,3	55143,8	46543,40
33	58.377,50	55.052,80	46.399,30	-0,54	-0,49	-0,49	58377,5	55052,8	46399,30
34	58.377,50	55.052,80	46.399,30	-0,54	-0,49	-0,49	58377,5	55052,8	46399,30
35	58.377,50	55.052,80	46.399,30	-0,54	-0,49	-0,49	58377,5	55052,8	46399,30
36	58.392,70	55.212	46.467,50	-0,53	-0,36	-0,40	58392,7	55212	46467,50
37	58.392,70	55.212	46.467,50	-0,53	-0,36	-0,40	58392,7	55212	46467,50
38	58.506,40	54.969,40	46.255,10	-0,41	-0,55	-0,67	58506,4	54969,4	46255,10
39	58.506,40	54.969,40	46.255,10	-0,41	-0,55	-0,67	58506,4	54969,4	46255,10
40	58.506,40	54.969,40	46.255,10	-0,41	-0,55	-0,67	58506,4	54969,4	46255,10
Média	58.920	55.683	46.785				58599	55275	46649
Desvio P.	1.003	1.290	790				210	369	432
						Background	2084	3038	379
						P corrigido	<b>56515</b>	<b>52237</b>	<b>46270</b>

A Figura 2.7 apresenta as principais fontes de incerteza de uma medida de pressão.



**Figura 2.7:** Diagrama de causa e efeito para uma medida de pressão estática.

Nesta são apresentadas as incertezas do Tipo A e do Tipo B. A incerteza do Tipo A considerada é apenas a incerteza das medidas obtidas pelo transdutor e depende do número de amostras. As incertezas do Tipo B estão relacionadas com o resultado da calibração e com a conversão analógica digital do sistema de aquisição de dados.

A incerteza padrão das medidas, Tipo A, pode ser obtida a partir da Equação (2.15).

$$u_{pA}^2 = \frac{S^2}{N} \quad (2.15)$$

Em que  $S$  é o desvio padrão da amostra e  $N$  é o número de amostras.

A incerteza combinada do Tipo B pode ser obtida por meio da Equação (2.16).

$$u_{pB}^2 = u_{calib}^2 + u_{conv}^2 \quad (2.16)$$

Em que  $u_{calib}^2$  é a incerteza da calibração e  $u_{conv}^2$  é a incerteza da conversão AD. Como o sistema de aquisição de dados é de 14 bits, considerou-se que esta incerteza é desprezível em relação a incerteza de calibração. Logo,  $u_{conv}^2 \approx 0$ . Assim, a incerteza combinada para a pressão pode ser expressa pela Equação (2.17).

$$u_p^2 = (u_{pAm}^2 + u_{calib}^2) + (u_{pAref}^2 + u_{calib}^2) \quad (2.17)$$

Em que  $u_{pAm}$  se refere a incerteza do Tipo A para as medidas de pressão realizadas durante o teste e  $u_{pAref}$  se refere a incerteza do Tipo A para as medidas de pressão de referência realizadas sem escoamento. Considerou-se para a incerteza expandida um nível de confiança de 95%, tomando assim um fator de abrangência,  $k$ , igual a 2. A incerteza expandida da pressão pode então ser expressa pela Equação (2.18).

$$U_p = k u_p \quad (2.18)$$

O caso mais crítico para estimativa da incerteza expandida de pressão ocorreu para o teste de PEO com concentração de 100 ppm e  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ . Para este teste a incerteza expandida relativa,  $U_p/\bar{p}$  foi de 0,23%.

Para a estimativa da incerteza de vazão foi adotado procedimento similar ao descrito acima, em que foi verificado uma incerteza expandida relativa,  $U_Q/\bar{Q}$  foi de 1,0 %, em que  $\bar{Q}$  é obtido pela média das leituras do medidor de vazão conforme a Equação (2.19).

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (2.19)$$

Para a estimativa da incerteza expandida relativa do fator de atrito experimental,  $f$ , pode-se utilizar a Equação (2.20).

$$\frac{u_f}{f} = 2 \sqrt{\left(5 \frac{u_D}{D}\right)^2 + \left(2 \frac{u_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{u_\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u_j}{j}\right)^2} \quad (2.20)$$

Em que  $j$  é igual a  $\left(\frac{\Delta p}{L}\right)$ ,  $u_D$  é a incerteza do diâmetro,  $u_Q$  é a incerteza da vazão,  $u_\rho$  é a incerteza da massa específica e  $u_k$  é a incerteza da queda de pressão por unidade de comprimento.

A partir da Equação (2.20) percebe-se a importância da qualidade das medições de diâmetro e vazão na estimativa da incerteza do fator de atrito experimental. Para o caso do pior cenário previamente apresentado, é obtida uma incerteza expandida relativa do fator de atrito experimental de 4,0%.

# Capítulo 3

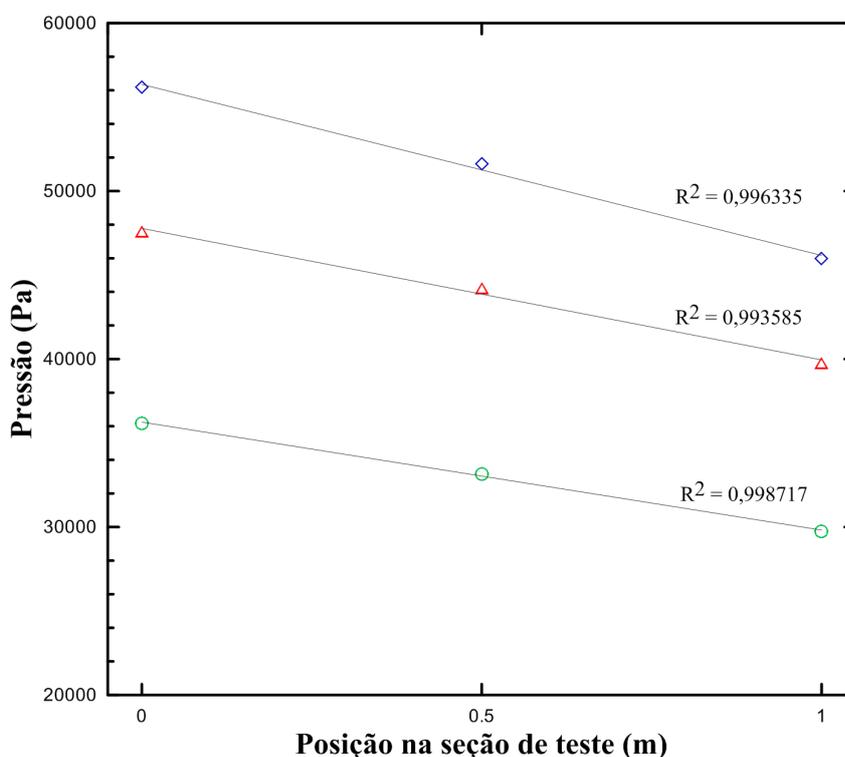
## Resultados

### 3.1 Validação da bancada experimental

Para garantir que as medidas de pressão fossem tomadas no escoamento turbulento completamente desenvolvido, três tomadas de pressão foram abertas aos medidores de pressão estática com uma incerteza na medida de 0,01% fornecidos pelo fabricante Warme. A tomada de referência para medição da pressão diferencial foi instalada em  $x_0/D = 22$ , em que  $x_0$  é a distância do flange da entrada do tubo teste até a primeira tomada de pressão (referência), e  $D$ , o diâmetro interno do tubo. A queda de pressão é obtida a partir das medições de pressão estática em cada tomada de pressão, sendo que a distância entre as tomadas é de 500 mm. Para cada tomada de pressão nos três pontos citados, foi realizado um furo de 2,0mm de diâmetro. A cada furo foi soldado um tubo de aço inoxidável de diâmetro interno de 1/8", com comprimento de 30 mm para montagem das mangueiras até o medidor de pressão. Para garantia do diâmetro interno do tubo após a soldagem das tomadas de pressão foi realizado brunimento interno, garantindo o diâmetro constante e conhecido.

Para verificar o funcionamento dos transdutores de pressão após a montagem, um conjunto de testes foi realizado com o intuito de observar a queda de pressão em função da posição dos transdutores. Para a realização deste teste, utilizou-se água filtrada em três vazões diferentes mantendo-se a temperatura do teste em 27°C. Os resultados são apresentados sob a perspectiva de pressão em função da posição na seção de teste.

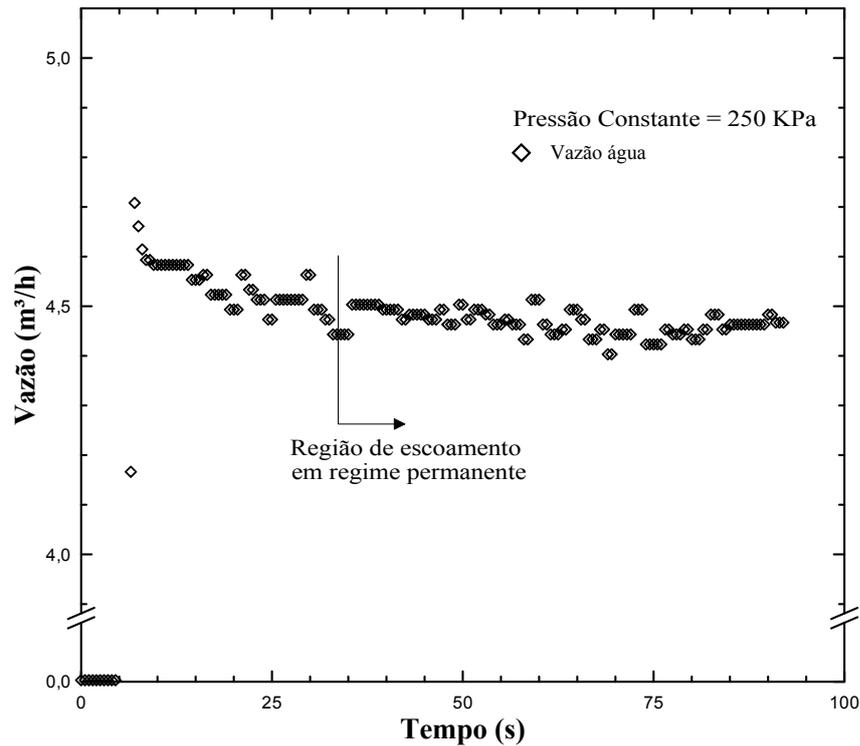
A Figura 3.1 ilustra o resultado da queda de pressão para os três experimentos realizados em que se obteve um coeficiente de correlação  $R^2 \geq 0,9935$ , o que demonstra que a montagem dos transdutores de pressão está adequada e que o escoamento se encontra completamente desenvolvido.



**Figura 3.1:** Gráfico da diferença de pressão.

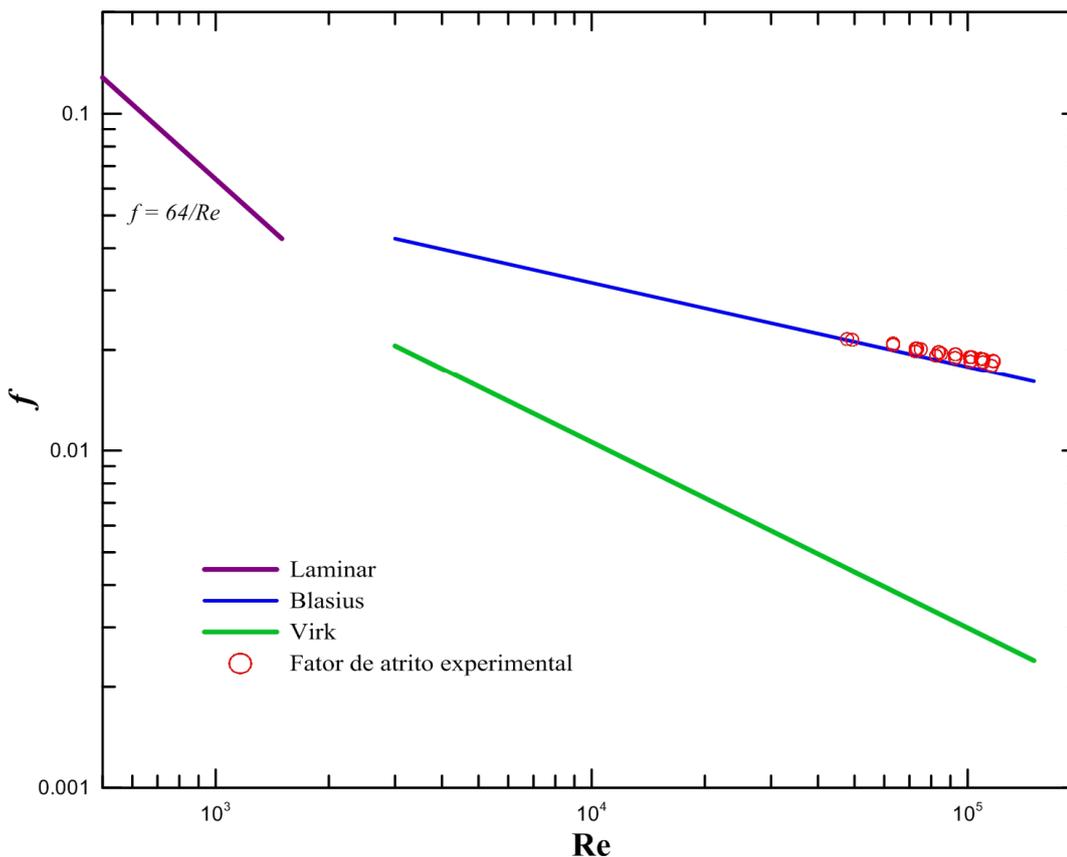
Outra avaliação importante realizada para a bancada experimental, que determina a redução de arraste, foi a medição de vazão. Para medir tal variável, foi escolhido o medidor do tipo magnético modelo Rosemount 8732 fabricado pela Emerson Progress que apresenta como característica principal a baixa perda de carga e perturbação no escoamento. Para garantir que as medidas de vazão estivessem em regime permanente, foi realizado um teste para avaliar o comportamento da vazão com o tempo de experimento de modo a se conhecer o intervalo de tempo em que as medidas de vazão e de pressão poderiam ser tomadas.

A Figura 3.2 apresenta o resultado sob a perspectiva de vazão em função do tempo em que é possível identificar que as aquisições de dados de vazão e pressão devem ser realizadas após trinta segundos a partir do momento em que se inicia os testes.



**Figura 3.2:** Gráfico de vazão versus tempo.

Depois da realização dos testes para identificar a confiabilidade dos medidores utilizados na bancada, o fator de atrito experimental foi calculado a partir da Equação(2.6), sendo comparado com o fator de atrito de Blasius para tubulação lisa, como é apresentado na Figura 3.3. O gráfico da Figura 3.3 foi construído a partir da realização de múltiplos passes, podendo-se variar a pressão na saída do compressor para o vaso de pressão, de modo que uma ampla faixa de número de Reynolds fosse obtido. O mesmo apresenta a curva de Blasius e a assíntota de Virk. O objetivo não é apenas em garantir os resultados, mas também calcular o fator de atrito do solvente que será utilizado para quantificar a redução de arraste nas soluções poliméricas. O erro máximo medido entre a curva de Blasius e os dados experimentais para a água foi da ordem de 6%, um valor considerado tolerável para dada complexidade da bancada. Os resultados encontrados para o solvente puro está de acordo com os reportados na literatura (Moussa et al. [58], Virk et al. [41] e Vanapali [53]).



**Figura 3.3:** Fator de atrito em função do número de Reynolds.

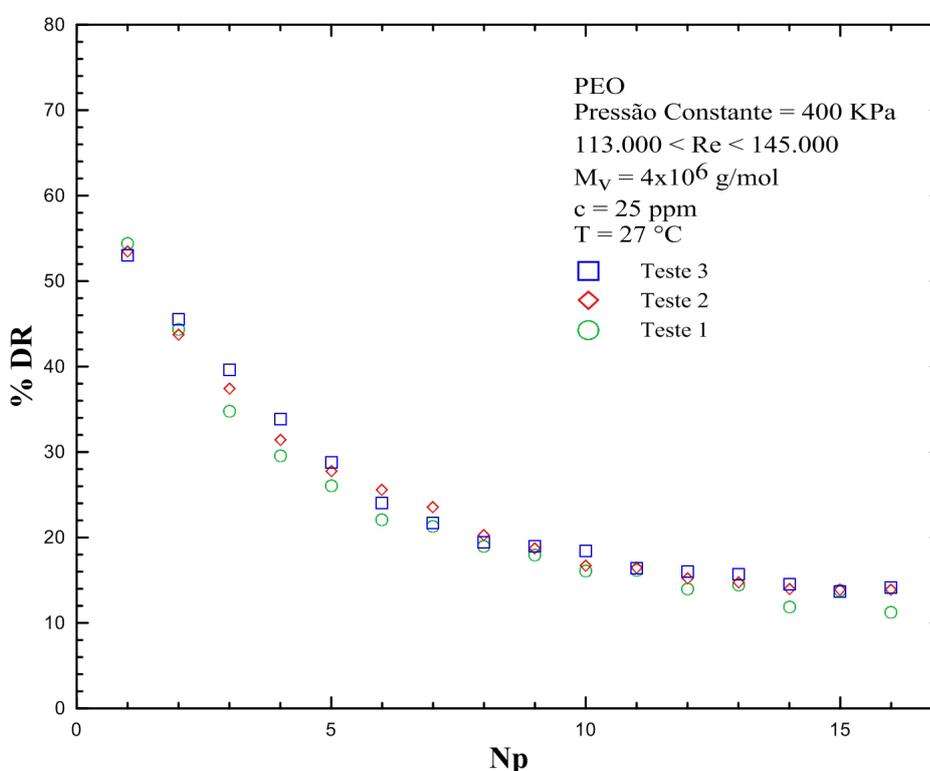
## 3.2 Resultados preliminares

Após a validação da montagem experimental a partir dos resultados obtidos com água, testes experimentais foram realizados com a solução de PEO a temperatura de  $27^{\circ}C$ . Para avaliar a repetitividade da planta experimental a partir do momento em que a solução era aditivada, três testes foram executados onde o aditivo utilizado foi o PEO com  $M_v = 4,0 \times 10^6 g/mol$  e concentração igual a 25 ppm. Para a realização destes testes, a pressão no vaso foi mantida constante a 400 kPa com dezesseis passes realizados. A faixa de número Reynolds dos testes foi de 113.000 a 145.000 em função da degradação polimérica. A Figura 3.4 mostra as curvas dos três testes, em que se pode verificar qualitativamente a proximidade dos resultados, o que confirma a estabilidade da planta e a repetitividade dos experimentos.

Experimentos apresentados por Solomon et al. [50] procuravam mensurar o quanto a molécula do polímero tende a se romper quando a solução é submetida a escoar por um circuito de tubulação diversas vezes. Notou-se que com o aumento do número de passes da solução no

circuito de tubulação, a degradação do polímero aumenta. Para o teste realizado os autores utilizaram o polímero óxido de polietileno com concentração de 100 ppm onde foram realizados dezesseis passes na tubulação.

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

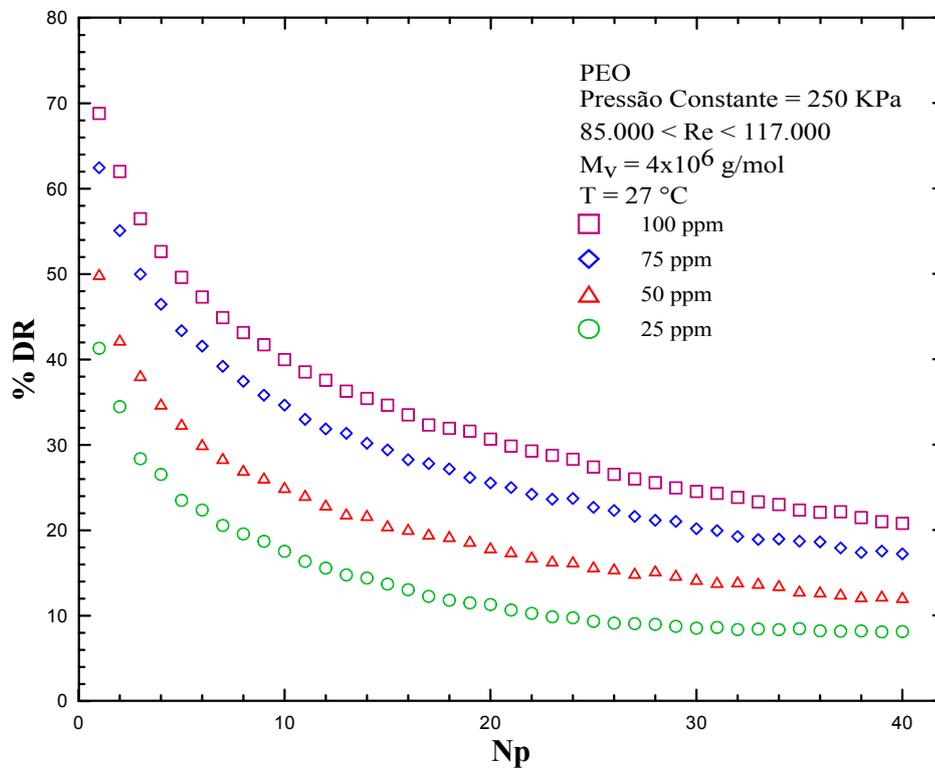


**Figura 3.4:** Redução de arraste DR, em função do número de passes  $N_p$ .

### 3.3 Efeito de concentração na redução de arraste

Os resultados apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6 ilustram a dependência da redução de arraste em função do número de passes para quatro concentrações (25, 50, 75 e 100 ppm) e duas massas moleculares ( $M_v = 5,0 \times 10^6$  g/mol  $M_v = 4,0 \times 10^6$  g/mol) estudadas. A solução é

vertida no vaso de pressão e o escoamento é garantido pela pressão constante de 250 kPa no vaso. A temperatura dos testes foi de aproximadamente  $27^{\circ}\text{C}$ . Para cada teste foram realizados quarenta passes. Observa-se que a redução de arraste é maior no primeiro passe para todas as concentrações e que diminui com o número de passes. É possível avaliar que a redução de arraste aumenta para concentrações mais elevadas como já reportado por Lumley [19], Vanapali [53], Virk [41]. Para a solução de PEO com  $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  e  $c = 100 \text{ ppm}$  é observado uma redução de arraste máxima da ordem de 70%, enquanto que para a solução de PEO com  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  na mesma concentração, foi observado uma redução de arraste máxima da ordem de 76%.

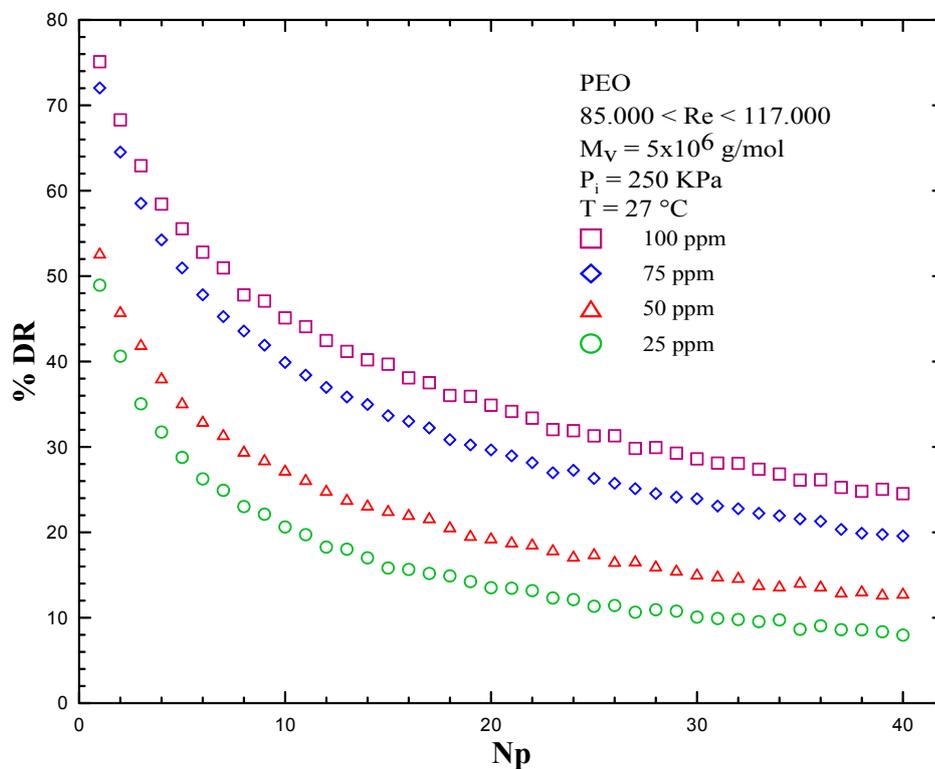


**Figura 3.5:** Efeito da concentração na redução de arraste em função do número de passes para  $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ .

É importante observar que a redução de arraste tende a um estado de equilíbrio final, no qual assume um valor assintótico, o que indica que a degradação do polímero cessa. A respeito da redução de arraste mínima, observado quando a redução de arraste tende a um valor assintótico, é possível visualizar o aumento na redução de arraste com o aumento da concentração, mesmo efeito observado por Pereira e Soares [54], Pereira et al. [55]. Para as concentrações utilizadas não foi possível determinar a concentração crítica, em que a solução polimérica se encontra

saturada na qual o aumento da concentração não provoca aumento na redução de arraste.

O aumento da redução de arraste em concentrações mais elevadas pode ser explicado por dois motivos. O primeiro devido à hipótese de que o aumento da concentração eleva o número de macromoléculas disponíveis para suprimir os vórtices turbulentos B. R. Elbing [69]. O segundo motivo baseia-se em que o aumento da concentração eleva-se a viscosidade extensional, o que causa uma diminuição na taxa de extensão e por consequência, menores esforços sobre cada macromolécula, aumentando assim a eficiência na redução de arraste E. W.Merril [70].

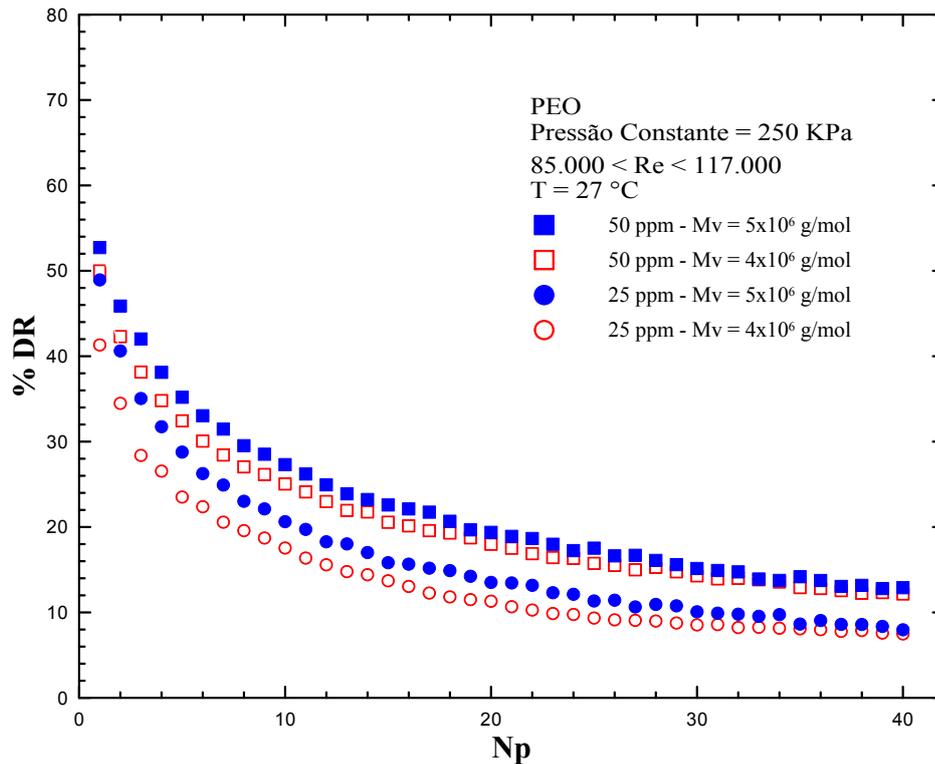


**Figura 3.6:** Efeito da concentração na redução de arraste em função do número de passes para  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ .

### 3.4 Efeito da massa molecular na redução de arraste

Para avaliar o efeito da massa molecular na redução de arraste, os resultados foram separados em duas partes. A Figura 3.7 ilustra os efeitos da variação da massa molecular na redução

de arraste para as concentrações de 25 ppm e 50 ppm. A pressão e a temperatura de teste são mantidos fixos para cada passe em 250 KPa e  $27^{\circ}C$ , respectivamente. É observado que  $DR_{max}$  aumenta para a solução de maior massa molecular, uma vez que os polímeros de massa molecular elevada ocupam maiores espaços no escoamento, suprimindo maiores números de vórtices.



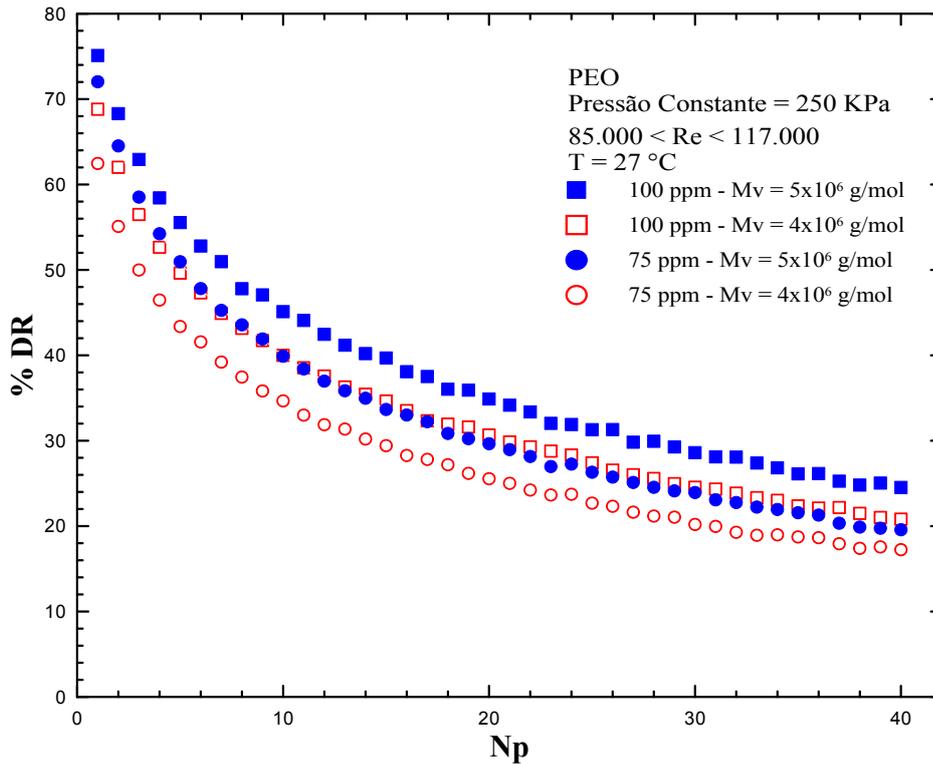
**Figura 3.7:** Efeito da massa molecular na redução de arraste em função do número de passes.

Para a concentração de 50 ppm é possível observar que a diferença do  $DR_{max}$  calculado para  $M_v = 5,0 \times 10^6$  g/mol foi aproximadamente 30% maior que a obtida para  $M_v = 4,0 \times 10^6$  g/mol, o mesmo não foi observado para a concentração de 25 ppm em que essa diferença ficou em torno de 20%.

A Figura 3.8 ilustra os efeitos da variação da massa molecular na redução de arraste para as concentrações de 75 ppm e 100 ppm. A pressão e a temperatura de teste são mantidos fixos para cada passe em 250 kPa e  $27^{\circ}C$ , respectivamente. Foi observado que o  $DR_{max}$  aumenta com o acréscimo de  $M_v$  porém não foi tão expressivo em relação aos testes realizados para concentrações menores.

Ao analisarmos os resultados obtidos para diferentes massas moleculares é possível observar

que a variação do  $DR_{max}$  diminui à medida que  $M_v$  aumenta, o que indica que a solução pode estar próxima da região de saturação polimérica. Conclui-se, então, que a partir de um determinado valor de massa molecular, que pode-se considerar crítica, obtém-se uma solução saturada para qual o aumento de  $M_v$  não provoca aumento em  $DR_{max}$ , observados por Sohn [37] e Choi et al. [51].

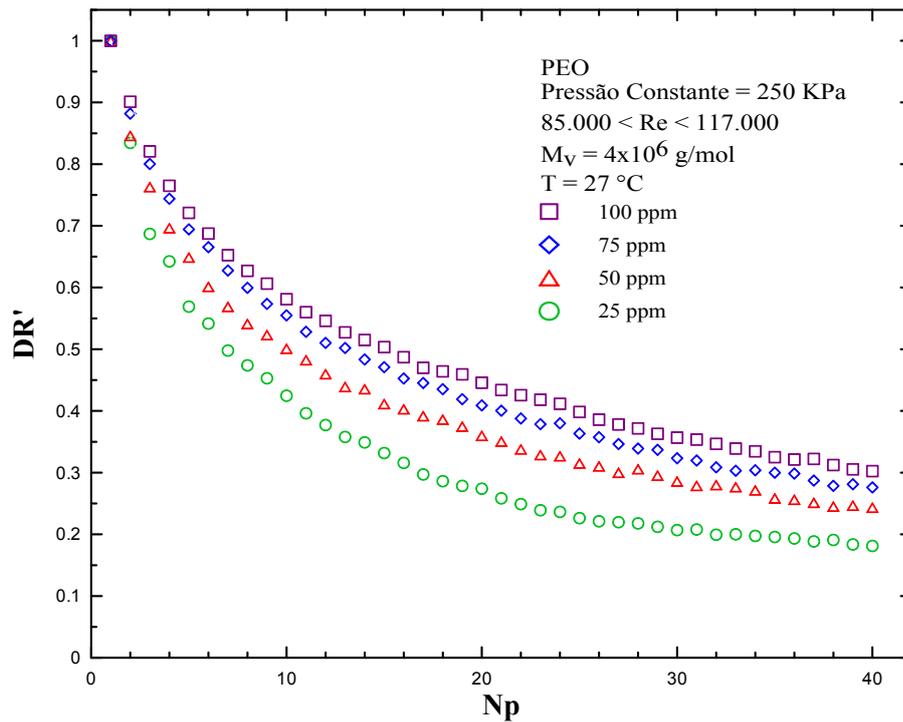


**Figura 3.8:** Efeito da massa molecular na redução de arraste em função do número de passes.

### 3.5 Efeitos de massa molecular e concentração no coeficiente de redução de arraste relativo

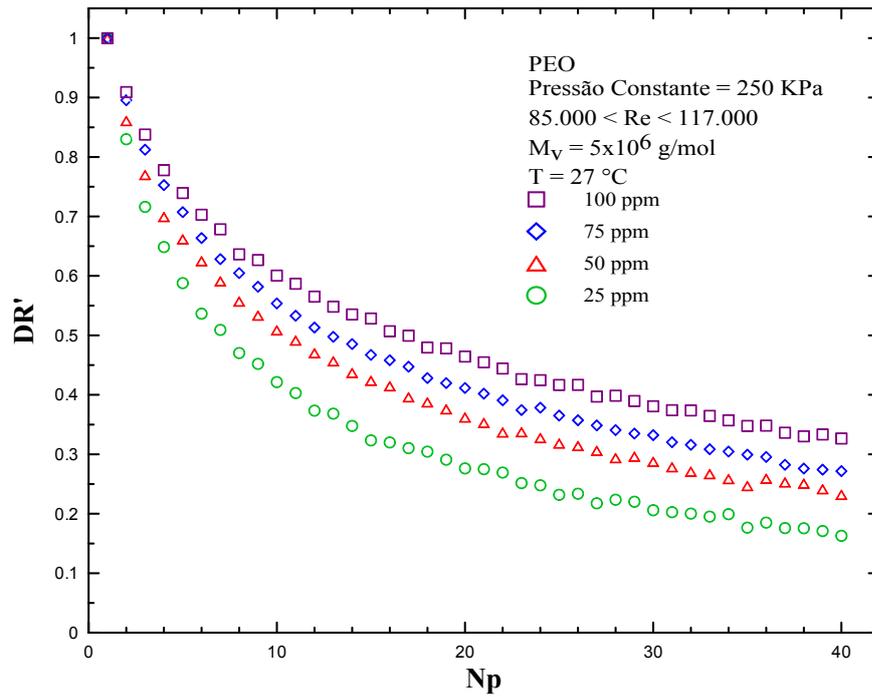
Os resultados obtidos anteriormente, apresentados em função da redução de arraste e números de passes, são reorganizados para dar ênfase a degradação polimérica através do coeficiente de redução de arraste relativo,  $DR'$ , definido anteriormente. Cada curva tem início em  $DR'_{max} = 1$ , até um valor final quando é observado um comportamento assintótico da redução de arraste  $DR'_{ass}$ . Efetuando a diferença de  $1 - DR'_{ass}$  é possível identificar a perda de eficiência na redução de arraste.

As Figuras 3.9 e 3.10 ilustram os efeitos de concentração na degradação das moléculas de PEO com  $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  e  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ . É observado que o aumento da concentração causa a redução das cisões poliméricas, onde acredita-se que a viscosidade extensional da solução aumenta devido ao incremento da concentração, fazendo com que a taxa de deformação extensional reduza, e consequentemente a degradação.

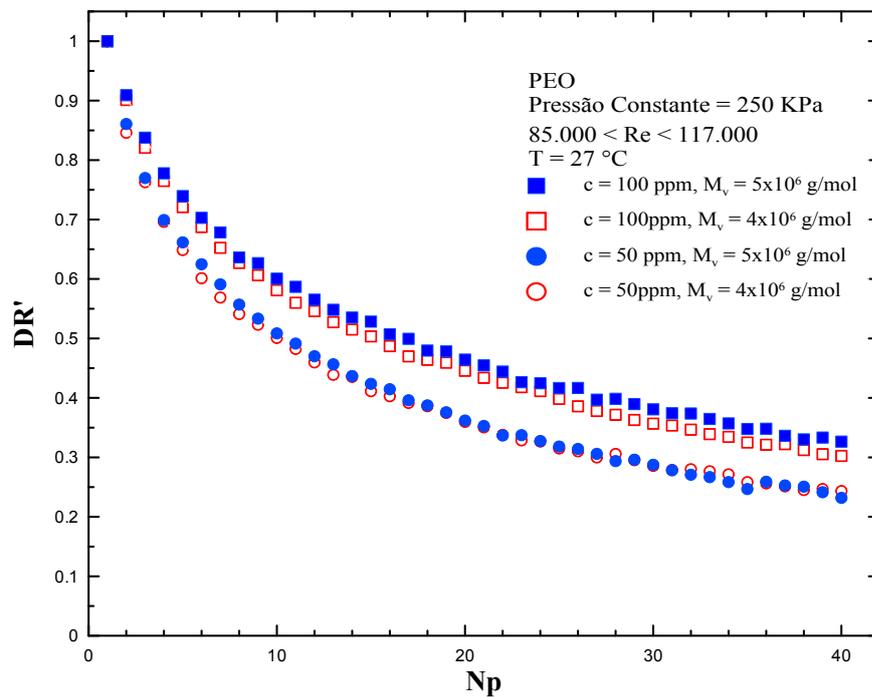


**Figura 3.9:** Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes para  $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ .

Os efeitos da variação de massa molecular sobre o coeficiente de redução de arraste relativo são ilustrados na Figura 3.11. Analisando-se as curvas das soluções de PEO para duas concentrações 50 e 100 ppm respectivamente, é possível avaliar que a degradação polimérica diminui a medida que a massa molecular aumenta conforme apresentado por Pereira e Soares [54], Pereira et al. [55].



**Figura 3.10:** Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes para  $M_v = 5,0 \times 10^6$  g/mol.

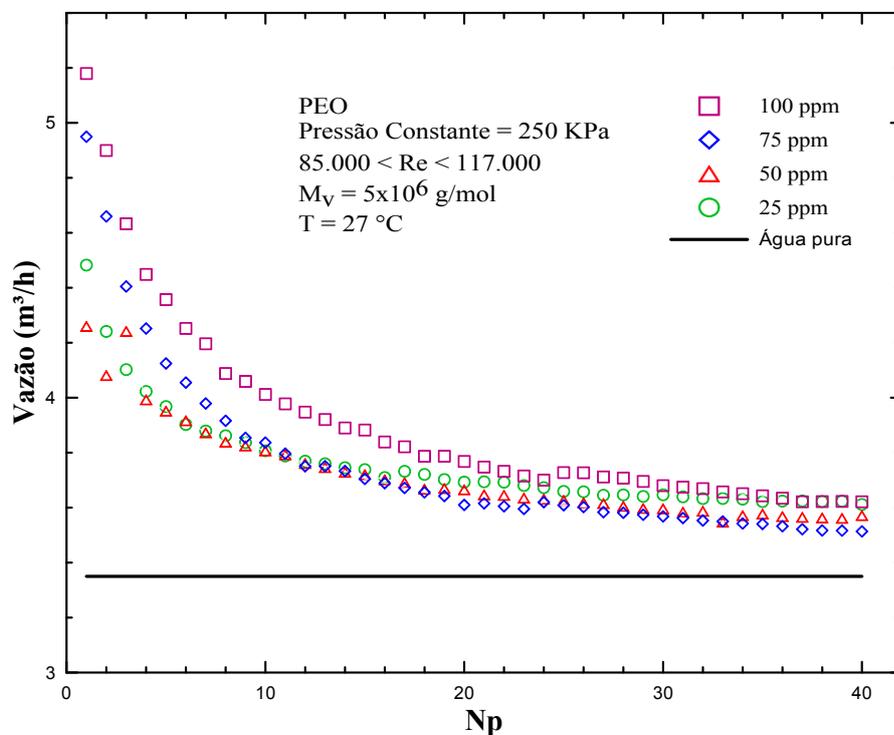


**Figura 3.11:** Efeito de concentração na redução de arraste relativa em função do número de passes.

### 3.6 Avaliação da concentração e massa molecular no fator de atrito de Fanning

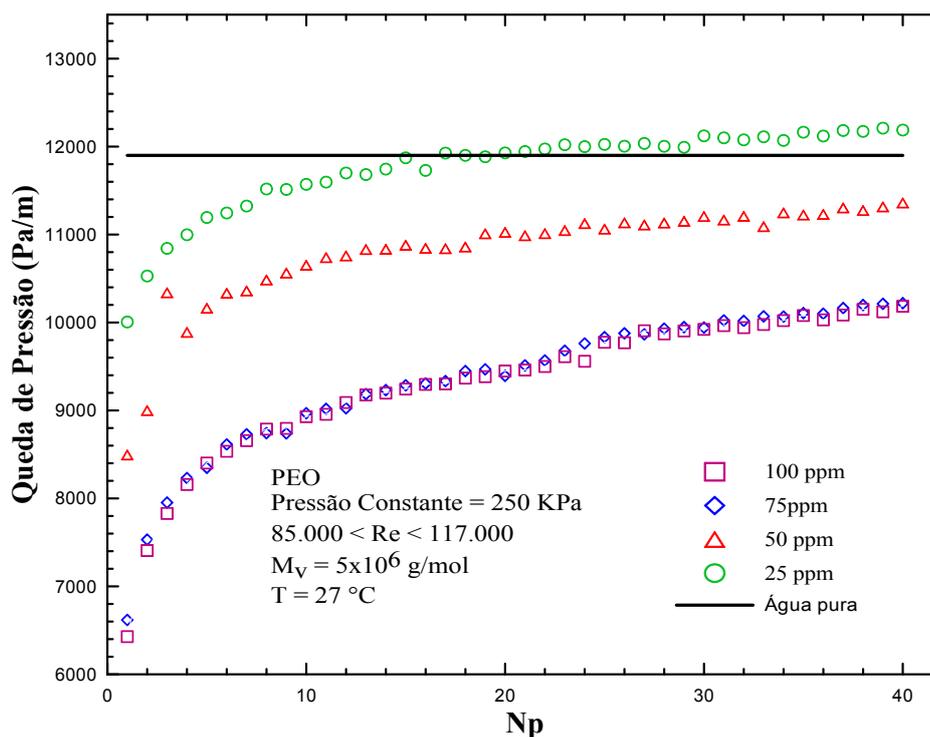
Para avaliar os resultados do fator de atrito de Fanning em função do número de Reynolds, uma análise do comportamento da vazão e da diferença de pressão em função do número de passes foi investigado. Para a realização destes testes, os valores de pressão, temperatura e massa molecular são mantidos fixos em 250kPa, 27°C e  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$ , respectivamente, com quatro concentrações diferentes 25, 50, 75 e 100 ppm.

O resultado demonstrado na Figura 3.12 ilustra a dependência da vazão em função do número de passes. É observado que a vazão é maior no primeiro passe para todas as concentrações utilizadas. Com o aumento do número de passes a vazão tende a um valor constante. Ao avaliar a vazão das soluções aditivas em relação ao solvente puro, é observado que a solução com concentração de 100 ppm teve um ganho de vazão máxima da ordem de 62,5%. Cabe ressaltar que a vazão das soluções aditivadas, mesmo após a degradação polimérica em função do aumento do número de passes, foi superior a vazão do solvente em 6%.



**Figura 3.12:** Avaliação da vazão em função do número de passes.

O resultado apresentado na Figura 3.13 demonstra a queda de pressão das soluções aditivadas em função do número de passes. Foi observado que a queda de pressão diminui em função do aumento da concentração. Após dezesseis passes realizados, os valores da queda de pressão para a solução aditivada com concentração de 25 ppm ficou próximo aos valores encontrados para o solvente.

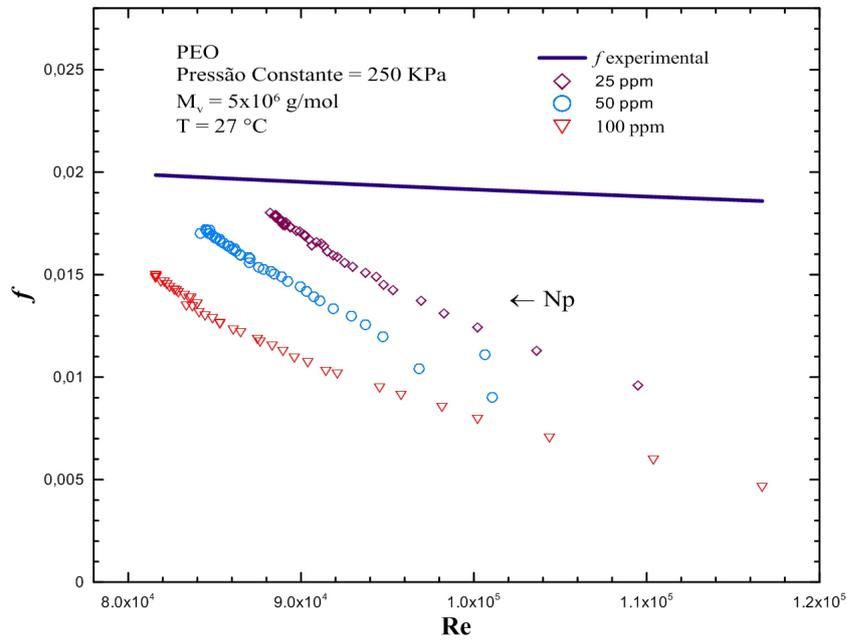


**Figura 3.13:** Efeito de queda de pressão em função do número de passes.

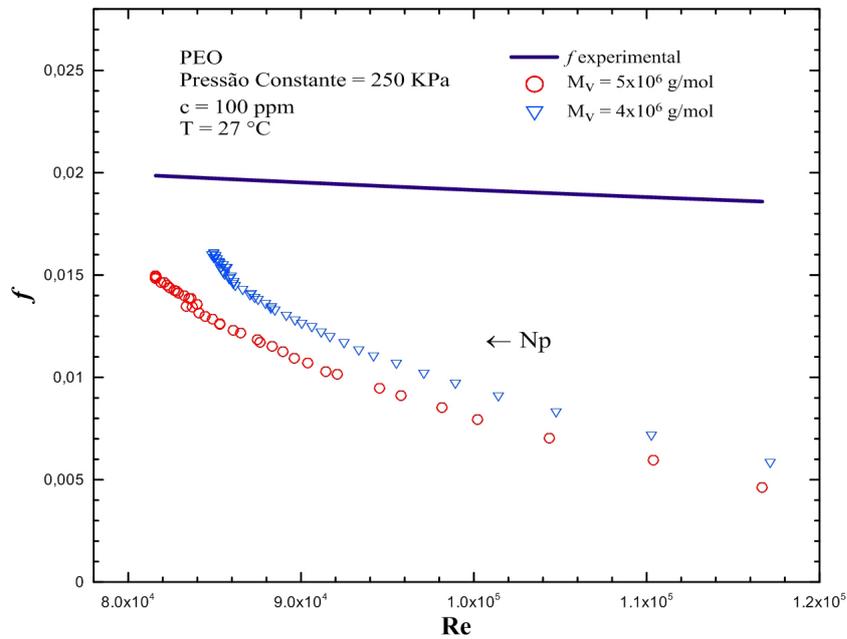
A Figura 3.14 mostra a dependência do fator de atrito de Fanning em relação à concentração. Para a realização dos testes a pressão e a temperatura são mantidos fixos em  $250\text{kPa}$  e  $27^\circ\text{C}$ , respectivamente, e três concentrações são utilizadas 25, 50 e 100ppm. É observado que a redução do fator de atrito se torna mais evidente em maiores concentrações, como verificado em outros trabalhos veja [41], [51], [53], [54] e [55]. É possível avaliar que o número de Reynolds diminui com o aumento do número de passes, ao contrário da pressão como observado nos testes. Isto acontece devido a perda de eficiência do aditivo causado pela degradação. O aumento da massa molecular do polímero apresenta efeitos semelhantes àqueles observados com o aumento da concentração.

O resultado apresentado na Figura 3.15 mostra a dependência do fator de atrito de Fanning em

diferentes massas moleculares de PEO, com concentração de 100 ppm. Verifica-se que com o aumento da massa molecular a redução do fator de atrito se torna mais evidente.



**Figura 3.14:** Efeito de concentração no Fator de Atrito de Fanning em função do número de Reynolds.



**Figura 3.15:** Efeito de massa molecular no Fator de Atrito de Fanning em função do número de Reynolds.

## Capítulo 4

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreveu a análise experimental da redução de arraste em escoamentos turbulentos por adição de polímero de alto peso molecular em uma planta experimental desenvolvida no Laboratório de Máquinas de Fluxos com o intuito de avaliar os efeitos da degradação em função do número de passes em diferentes variáveis ( $Re$ ,  $c$ ,  $M_v$ ). O polímero utilizado foi o Óxido de Polietileno (PEO). Os resultados são avaliados em função do coeficiente de redução de arraste,  $DR$ , definido como  $DR = 1 - f/f_0$ , em que  $f$  e  $f_0$  representam o fator de atrito de Fanning da solução polimérica e do solvente, respectivamente e através do coeficiente de redução de arraste relativo,  $DR'$ , definido como  $DR' = DR(N_p)/DR_{max}$ , onde  $DR_{max}$  representa a máxima redução de arraste observada durante o experimento.

Foi realizado uma análise criteriosa a respeito do procedimento de preparação das amostras utilizadas nos testes onde foi verificado que as soluções perdem eficiência na redução de arraste quando são estocadas de maneira incorreta.

Os resultados obtidos apresentam alta concordância com os resultados teóricos para os casos sem redução de arraste o que possibilita alta confiabilidade nos resultados de experimentos com redutores de arraste. A montagem experimental projetada para o laboratório é capaz de medir o fator de atrito de soluções com redutores de arraste auxiliando no desenvolvimento de projetos de fluidos. O estudo de redução de arraste e de degradação polimérica pode ser mais aprofundado auxiliando na preparação da curva de eficiência temporal do polímero redutor de arraste em diferentes temperaturas de operação.

Foram avaliadas as incertezas das medidas do fator de atrito que foi da ordem de 4%.

Para a solução de PEO com  $M_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  e  $c = 100 \text{ ppm}$  foi observado uma redução de arraste máxima da ordem de 70%, enquanto que para a solução de PEO com  $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$  na mesma concentração, foi observado uma redução de arraste máxima da ordem de 76%. Foi observado que o incremento da concentração causa um aumento na redução de arraste.

Foi observado que  $DR_{max}$  aumenta para a solução de maior massa molecular, uma vez que os polímeros de massa molecular elevada ocupam maiores espaços no escoamento, suprimindo maiores números de vórtices.

Efetuando a diferença de  $1 - DR'_{ass}$  foi possível identificar a perda de eficiência na redução de arraste.

Foi observado que a redução do fator de atrito se torna mais evidente em maiores concentrações, como verificado em outros trabalhos na literatura.

Verificou-se que com o aumento da massa molecular a redução do fator de atrito se tornou mais evidente.

## Referências Bibliográficas

- [1] Toms, B. A. "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large reynolds numbers," Proceedings of the International Congress of Rheology, Holland, North-Holland, Amsterdam, Section II, pp. 135-141, 1948.
- [2] Burger, E. D. and Chorn, L. G. "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing prudhoe bay crude oil," J. Rheology, vol. 24, pp. 603, 1980.
- [3] Motier, J. F. and Carrier, A.M. "Recent studies on polymer drag reduction in commercial pipelines," In: Sellin, R. H. J. and Moses, R. T. "Drag reduction in fluid flows," Ellis Horwood, Chichester, pp. 197-204, 1989.
- [4] Sellin, R. H. J. " Polymer drag reduction in large pipes and sewers - Results of recent trials," J. Rheology, vol. 24, pp. 667-684, 1980.
- [5] Arnbom, L and Hagstrand, U. "Toms effect in district heating tube systems," Report SVF-50, Studsvik, Swedish, 1977.
- [6] Elperlin, I. T., Levental, L. I. and Chesnolov, Y. N. "Decreasing the hydraulic resistance of heating networks," Thermal Engineering, vol. 18, pp. 28-32, 1971.
- [7] Leca, A. and Leca, M. "Drag reduction and heat transfer measurements with polyacraylamides on a model of a district heating system," In: Sellin, R. H. J. and Moses, R. T. "Drag reduction," University of Bristol, D8, pp. 1-8, 1984.
- [8] Pollert, J., Kolar, V. and Havlik, V. "Drag reduction and its engineering applications," Acta Polytechnica, Series of Technical University in Prague, pp. 133-142, 1982.

- [9] Povkh, I. L., Stupin, A. B., Maksjutenko, S. N., Aslanov, P.V. and Simonenko, A.P. "Features of turbulent flows of surfactant solutions of micelle forming surfactants," *Mekhanika turbulentnykh potokov, Tretja vsesojusnaja Konferenzija, Moscow, 1980.*
- [10] Ohlendorf, D. apud Gyr, A. and Bewersdorff, W. "Fluid mechanics and its applications: Drag reduction of turbulent flows by additives," Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [11] Gyr, A. and Bewersdorff, W. "Fluid mechanics and its applications: Drag reduction of turbulent flows by additives," Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [12] Pollert, J. and Kolar, V. "Sludges and their transport by pipelines," *Symp. Of Council of Material Economic Help, Prague, vol. 17, 1977.*
- [13] Pollert, J. "Today and future possibilities of industrial applications of drag reduction: The influence of polymeric additives on velocity and temperature fields," Berlin: B. Gampert, 1985. pp. 183-197.
- [14] Fabula, G. "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction," *Trans ASME J Basic Engng, pp. 93-453, 1971.*
- [15] Figueredo, R. C. R. and Sabadini, E. "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide," *Colloids and Surfaces A, vol. 215, no. 1-3, pp. 77-86, 2003.*
- [16] Greene, H. L., Thomas, L. C., Mostardi, R. A. and Nokes, R. F. "Potential biomedical applications of drag reducing agents," *Proc. Int. Conf. on Drag Reduction, Cambridge, 1974.*
- [17] Kulicke W. -M., Andreis M., Grager H., Koenig J. L., Koter M.; *Advances in Polymer Science, Polymer Solutions, Vol.89, Springer - Verlag, Berlin 1989, 1-45.*
- [18] Choi, H. J. and Jhon, M. S. "Polymer-induced turbulent drag reduction," *Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 35, pp. 2993-2998, 1996.*
- [19] Lumley, J. L. "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives. j. polym," *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews, vol. 7, pp. 263-290, 1973.*
- [20] Hinch, E. J. "Mechanical models of dilute polymer solutions in strong flows," *Phys. Of Fluids, vol. 20, pp. 22-30, 1977.*

- [21] Ryskin, G. "Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory," *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 2059-2062, 1987.
- [22] De Angelis E., Casciola C. M., L'Vov V. S., Procaccia I. and Tiberkevich V. "Drag Reduction by a Linear Viscosity Profile," *Physical Review E*, vol. 70, 2004.
- [23] Tabor, M. and Gennes, P. G. D. "A cascade theory of drag reduction," *Europhysics Letter*, vol. 7, pp. 519-522, 1986.
- [24] Savins, J. G. "Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 4, p. 203, 1964.
- [25] Gadd, G. E. "Friction reduction. In: *Encyclopedia of polymer Science and technology*," Interscience, vol.15, p. 224-253, 1975.
- [26] Gordon, R. J. "New Viscoelastic Phenomenon and Turbulent Drag Reduction" *Nature*, vol.227, pp.599-600, August 1970.
- [27] Peterlin, A. "Molecular model of drag reduction by polymer solutes," *Nature*, vol.227, pp.874-1966, 1970.
- [28] Lacey P. M. C. "Drag reduction by long-chain polymers," *Chem Eng Sci*, vol. 29, pp. 1495, June 1974
- [29] Gadd, G. E. "Turbulence damping and drag reduction produced by certain additives in water" *Nature*, vol. 206, pp. 463, 1965.
- [30] Gadd, G. E. "Differences in normal stress in aqueous solutions of turbulent drag reducing additives" *Nature*, vol. 212, pp. 1348, 1966.
- [31] Johson, B.; Barchi, R. H. "Effect of drag reducing additives on boundary-layer turbulence," *Journal of Hydronautics*, vol. 2, pp.108, 1968.
- [32] Savins, J. G. "A stress-controlled drag-reduction phenomenon," *Rheologica Acta*, vol. 6, pp. 323-330, 1967.
- [33] Dubief, Y.; White, C. M.; Terrapon, V. E.; Shaqfeh, E. S. G.; Moin, P. and Lele, K. "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows," *J.*

Fluid Mech, vol. 514, pp. 271-280, 2004.

[34] Flory, P. J. "Principles of Polymer Chemistry". Ithaca, NY: Cornell University Press, 1971.

[35] Deshmukh, S. R. and Singh, R. P. "Drag reduction characteristics of graft copolymers of xanthangum and polyacrylamide," Journal of Applied Polymer Science, vol. 32, pp. 6163-6176, 1986.

[36] Bewersdorff, H. W. and Singh, R. P. "Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions," Rheologica Acta, vol. 27, pp. 617-627, 1988.

[37] Sohn, J. I. Kim, C. A. Choi, H. J. and Jhon, M. S. "Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus," Carbohydrate Polymers, vol. 45, pp. 61-68, 2001.

[38] Scrivener, O., Koop, C., 1977. Influence of polymer solutions on the structure of turbulence in a pipe. The Phys. Fluid 20, 10.

[39] Kulik, V.M., 2001. Drag reduction change of polyethyleneoxide solutions in pipe flow. Experiments in Fluids 31, 558-566.

[40] Virk, P. S. Mickley, H. S. and Smith, K. A. "The toms phenomom: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions," Journal of Fluid Mechanics, vol. 22, pp. 22-30, 1967.

[41] Virk, P. S. "Drag reduction fundamentals," AIChE Journal, vol. 21, pp. 625-656, 1975.

[42] Sreenivasan K. R. and White, C. M. "Analysis of polymer drag reduction on a flat plate," Journal of Fluid Mechanics, vol. 409, pp. 149-164, 2000.

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

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

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

- [46] White, D. A. "Preliminary experiments on polymer degradation in a turbulent shear field," Chem. Engng. Sci, vol. 25, pp.1255-1258, August 1970.
- [47] Gold, P. I.; Amar, P. K., Swaidan, B. E. "Friction reduction degradation in dilute poly(ethylene oxide) solutions," Journal Appl. Polymer Sci, vol. 17, pp. 333-350, February 1973.
- [48] Ellis, A. I.; Ting, R.Y.; Nadolink, R. H. "Some effects of storage and shear history on the friction reducing properties of dilute polymer solutions" Prog Astronaut Aeronaut, vol. 70, pp. 532, 1970.
- [49] Paterson, R. W. and Abernathy, F. H. "Turbulent flow drag reduction and degradation with dilute polymer solutions," J. Fluid Mech, vol. 43, pp. 689-710, 1970.
- [50] Solomon, J. M., Vanapalli, S. A. e Islam, T. M. "Scission-induced bounds on maximum polymer drag reduction in turbulent flow," Physics of Fluids. 2005, Vol. 17.
- [51] Choi, H. J. Kim, C. A. Sohn, J. and Jhon, M. S. "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction," Polymer Degradation and Stability, vol. 69, pp. 341-346, 2000.
- [52] Nakken, T. Tande, M. and Elgsaeter, A. "Measurements of polymer induced drag reduction and polymer scission in taylor flow using standard double-gap sample holders with axial symmetry," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 97, pp. 1-12, 2001.
- [53] Vanapalli, S. A. Islam, T. M. and Solomon, J. M. "Universal scaling for polymer chain scission in turbulence," Physics of Fluids, vol. 17, 2005.
- [54] Pereira, A. S. and Soares, E. J. "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 179, pp. 9-22, 2012.
- [55] Pereira, A.S, Soares, E.J, Andrade, R.M "Drag reduction induced by flexible and rigid molecules in a turbulent flow into a rotating cylindrical double gap device: Comparison between Poly (ethylene oxide), Polyacrylamide, and Xanthan Gum" Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, pp. 72-87, 2013.
- [56] Liberatore, M. W. et al. "Turbulent drag reduction of polyacrylamide solutions: effect

of degradation on molecular weight distribution," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 123, pp.175, 2004

[57] Merrill, E. W. and Horn, A. F. "Scission of macromolecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows," *Polymer Communications*, vol. 25, pp. 144-146, 1984.

[58] Moussa, T. and Tiu, C. "Factors affecting polymer degradation in turbulent pipe flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681-1692, 1994.

[59] F. Hadri, A. Besq, S. Guillou, and R. Makhlof, "Temperature and concentration influence on drag reduction of very low concentrated ctac/nasal aqueous solution in turbulent pipe flow," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, pp. 326-331, 2011.

[60] Bailey, F.E., Koleske, J.V., "Poly(ethylene oxide)", Academic Press Inc. New York, 1976.

[61] Devanand, K., Selser, J.C Asymptotic "Behavior and long-range interactions in aqueous solutions of poly(ethylene oxide)" *Macromolecules* vol. 35, pp 987-1001

[62] Kjellander, R., Florin, R. "Water structure and changes in thermal stability of system poly(ethylene oxide)" *J. Chem. Soc.*, vol. 77, pp. 2053-2077.

[63] Crupi, V., Faraone, A., Majolindo, D., Venuti, V., "Effect of H-bond active sites transport properties of poly(ethylene oxide) dissolved in its monomers: shear viscosity and diffusion coefficient studies." *J.Chem. Phys*, vol 112, pp 5205-5211

[64] Glass J.E "Adsorption characteristics of water- soluble polymers. *J. Phys.Chem.*. 72, pp 4450-4458,1968.

[65] Little, R.C, Wiegard, M. "Drag reduction and structural turbulence in flowing poliox solutions. *J. Appl. Polym. Sci*, vol. 14, pp. 409-419, 1989.

[66] Bizotto, V. C. and Sabadini, E. "Poly(ethylene oxide) x polyacrylamide. which one is more efficient to promote drag reduction in aqueous solution and less degradable," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 25, pp. 1844-1850, 2008.

[67] Wyatt, N. B. Gunther, C. M. and Liberatore, M. W. "Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol.

166, pp. 25-31, 2011.

[68] FOX, R. W. & MCDONALD, A. T.; Introdução à Mecânica dos Fluidos. Editora Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1995, Pg. 274-279.

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

[70] E. W. Merrill and A. F. Horn, 1984, "Scission of macromolecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows," Polymer Communications, vol. 25, pp. 144-146.

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

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

# **Apêndice A**

## **ANEXO 1**

## DETALHAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

### Especificação dos equipamentos

#### 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 faixa.

#### 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

#### Placas de aquisição de dados:

- Fabricante: National Instruments;
- Modelo 1: módulo de entrada analógica para termopar NI 9211 (PN 198864C);
- 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).

Vaso de pressão:

- Fabricante: Engetank;
- Capacidade volumétrica: 350 litros,
- Paredes em chapa de aço SA-36 com 4,75 mm de espessura;
- Pressão máxima de trabalho admitida: 8,70 kgf/cm<sup>2</sup>;
- 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 e segurança, além de permitirem a entrada e saída de fluido de trabalho e ar comprimido;

Na figura 5.1 é mostrado o desenho técnico do vaso de pressão apresentado pelo fabricante, onde estão especificadas todas as suas medidas e características técnicas.

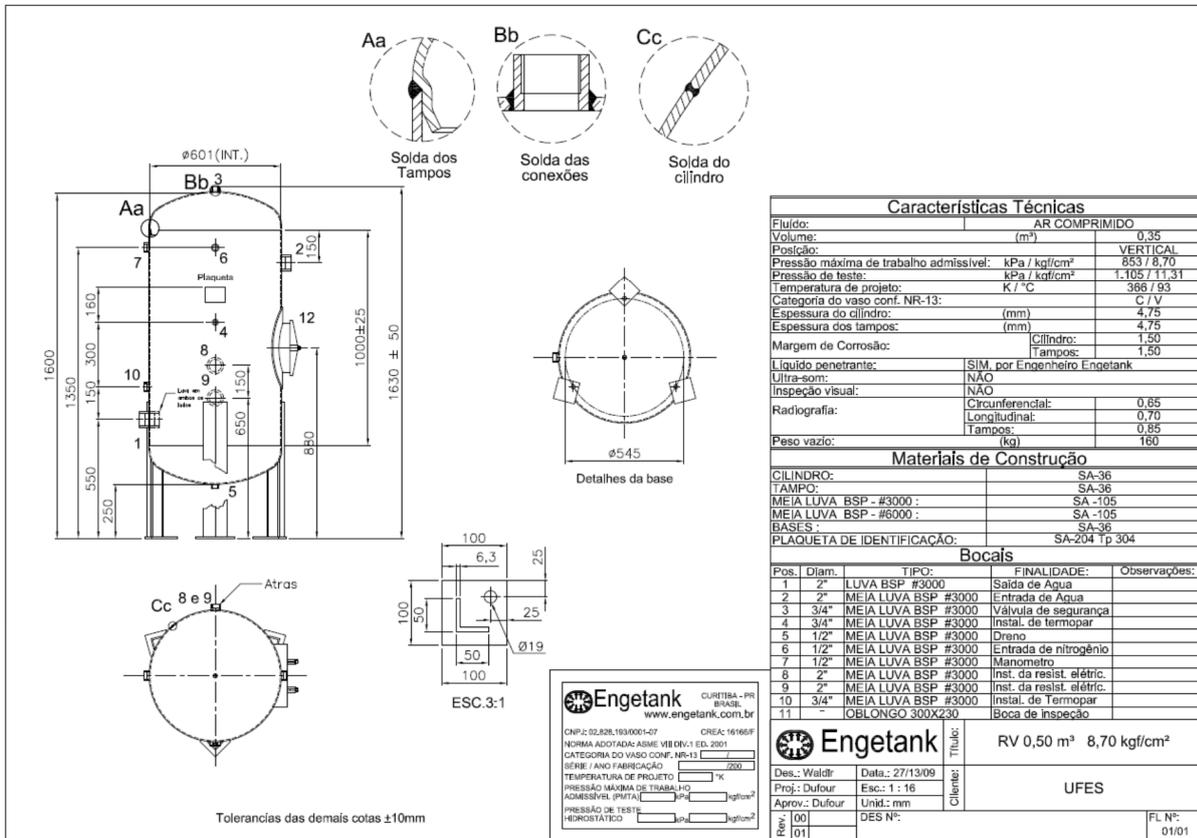


Figura 5.1 – Desenho esquemático do vaso de pressão.

Transmissores de pressão:

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

- Fornecidos com certificado de calibração RBC – Inmetro (Rede Brasileira de Calibração).

Segue dados obtidos na calibração para cada transdutor:

PT-01

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

PT-02

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

PT-03

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

Termopares:

Fabricante: Iope;

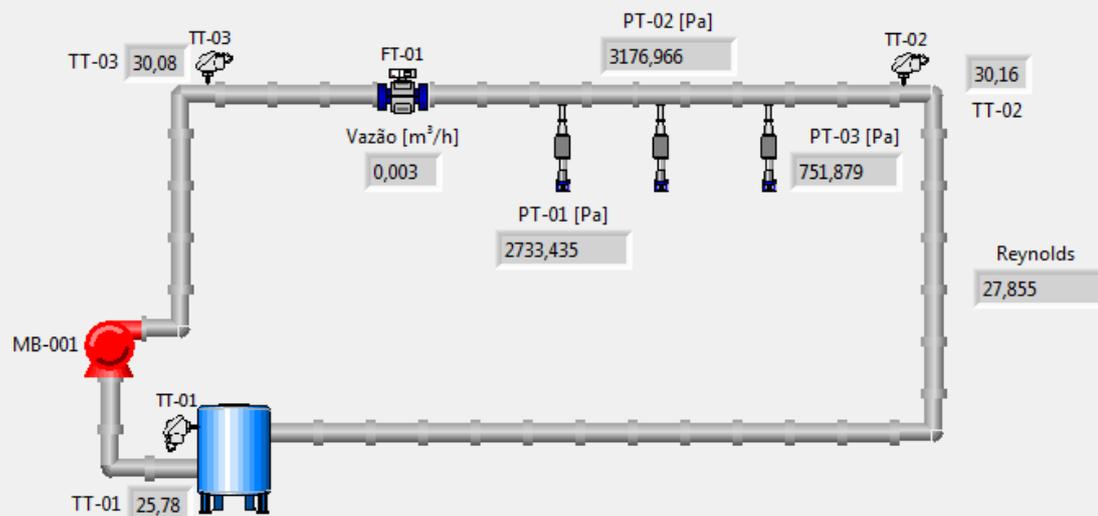
# **Apêndice B**

## **ANEXO 2**



UFES

## EXPERIMENTO DE PERDA DE CARGA MEDIDOR MAGNÉTICO



Principal Reynolds Temperatura

Velocidade Bomba

Liga/Desliga Automático Manual

Ganhos PID

Proporcional (Kc)	50,000
Integral (Ti, min)	0,0008
Derivativo (Td, min)	0,000

Setpoint em Vazão

SP [m<sup>3</sup>/h] 1,85285f

