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

GUSTAVO ALONSO BARRIENTOS SANDOVAL

PERDA DE EFICIÊNCIA EM REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS EM TUBOS COM PRESSÃO DE ENTRADA FIXA.

VITÓRIA
2015

GUSTAVO ALONSO BARRIENTOS SANDOVAL

PERDA DE EFICIÊNCIA EM REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS EM TUBOS COM PRESSÃO DE ENTRADA FIXA.

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

2015

GUSTAVO ALONSO BARRIENTOS SANDOVAL

PERDA DE EFICIÊNCIA EM REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS EM TUBOS COM PRESSÃO DE ENTRADA FIXA.

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 30 de Janeiro de 2015.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Roney Leon Thompson
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

"Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste em uma reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”

Henry Ford

À Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por dar-me saúde e sabedoria necessária para conquistar este sonho. Toda a glória seja para Ele.

Agradeço à minha família pelos inumeráveis sacrifícios, amor e confiança. Especialmente aos meus pais, meus melhores mestres.

Agradeço ao professor Edson José Soares por sua orientação e disposição para a realização deste projeto. É e será sempre um prazer trabalhar com Ele.

Agradeço aos professores Márcio Ferreira Martins, Rogério Ramos, José Joaquim Santos e Renato do Nascimento Siqueira por a colaboração e o conhecimento oferecido.

Agradeço aos amigos e colegas de mestrado, em especial a Renata Trevelin, Fabrício Thomaz, Rafhael milanezi, Lucas Silveira e Anselmo Pereira. Com quem compartilhei conhecimentos e me ajudaram incansavelmente na realização dos testes. Desejo bênçãos e sucessos em suas vidas.

Agradeço às funcionárias e colegas da secretaria do programa de pós-graduação, Maria José dos Santos e Andréia Eyng pela atenção e a gentileza.

Agradeço à OEA (Organização dos Estados Americanos) e o Programa de Alianças para Educação e a Capacitação – PAEC-OEA-GCUB 2012 pela oportunidade de realizar este mestrado.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e à Petrobras pela bolsa de estudos e pelo financiamento dos materiais e serviços necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A adição de pequenas partes por milhão de polímero de alta massa molecular em escoamentos turbulentos produz uma significante diminuição do fator de atrito. Este fenômeno conhecido como redução de arrasto (DR) tem-se tornado de bastante interesse para a comunidade científística e industrial devido às grandes vantagens nas diversas áreas da engenharia. Porém, a eficiência da redução de arrasto não é constante, devido à interação do aditivo com os vórtices turbulentos que causam a quebra da estrutura molecular da cadeia polimérica. Estudos têm reportado que essa degradação depende de fatores como: o número de Reynolds, a temperatura, o tipo de aditivo e a concentração e a massa molecular do mesmo. O fenômeno ainda não é completamente compreendido e muitos aspectos do problema carecem de investigação. Questões importantes são relacionadas ao desenvolvimento das estruturas turbulentas após a injeção do aditivo e a quebra ou a formação de agregados das moléculas do polímero. Investiga-se no presente trabalho a eficiência da redução de arrasto em soluções aquosas diluídas para três diferentes polímeros: Óxido de Polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Os dois primeiros são conhecidos como polímeros flexíveis, enquanto o último é considerado rígido. Uma bancada composta de tubulações com configuração em serie é utilizada para a realização dos experimentos, na qual o material da seção principal do teste é aço inoxidável com tratamento de brunimento. Os efeitos de DR produzidos pela variação da concentração e da massa molecular são analisados. Os principais resultados são apresentados em função da redução de arrasto absoluta. Também é exposto e quantificado o aumento da vazão e a diminuição na queda de pressão na tubulação, apesar de que os testes foram feitos à pressão constante na bancada. Visando-se observar a degradação, os resultados de DR absoluto são reorganizados e apresentados em termos do coeficiente de redução de arraste relativo, DR'. Posteriormente, estes mesmos dados de DR' são ajustados mediante uma função de

decaimento que é baseada na equação proposta por Pereira e Soares (2012) para um dispositivo cilíndrico rotatório. Finalmente, se mostram resultados promissores que são obtidos com a mistura dos polímeros em estudo.

ABSTRACT

The addition of small parts per million of high molecular weight polymer in turbulent flow produces a significant decrease in the friction factor. This phenomenon known as drag reduction (DR) has become of great interest for the industrial and scientist community because of the great advantages in several engineering areas. However, the drag reduction efficiency is not constant, due to interaction between the additive with turbulent eddies that causes the breakdown of the molecular structure of the polymer chain. Researches have reported that this degradation depends on factors as: Reynolds number, temperature, additive type, its concentration and molecular weight. The DR phenomenon is not completely understood and many aspects of the problem remain unclear. Important issues are related to the development of turbulent structures after the additive injection and the breaking or aggregation in the polymer molecules. In the present work is investigated the drag reduction efficiency in dilute aqueous solutions for three different polymers: Poly(ethylene oxide) (PEO), Polyacrylamide (PAM) and Xanthan Gum (XG). The first two are known as flexible molecules while the last one is considered rigid. An experimental apparatus made up of pipes disposed in series configuration is used for the realization of the experiments, in which the material of the main section of the test is of stainless steel with polished treatment. The drag reduction effects produced by the variation of the concentration and the molecular weight are analyzed. The main results are displayed in terms of absolute drag reduction. Besides that, is shown and quantified the flow rate increase and the decrease of the pressure drop in the pipe, despite of tests being conducted at a fixed inlet pressure in the apparatus. Aiming to observe the degradation, the absolute drag reduction results are reorganized and displayed in terms of a relative drag reduction, DR'. Posteriorly, these same DR' data are adjusted by means of a decaying function that is based on the equation proposed by Pereira and Soares (2012) for a rotating cylindrical device. Finally, there are shown some promising results that are obtained by mixing the polymers studied in this work.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diferença do jato de água para uma solução com e sem aditivos. Fonte desconhecida. 20

Figura 1.2 – Espectro de energia E(k) versus número de ondas (K). O efeito elástico ocorre só nas pequenas escalas do escoamento turbulento.....24

Figura 1.3 – Interação do polímero elástico com o escoamento turbulento. Figura tomada do artigo Dubief *et al.* (2004). 25

Figura 1.4 – Estados do polímero ao repouso e quando é submetido a uma taxa cisalhante. 26

Figura 1.5 – Máxima redução de arrasto em coordenadas Prandtl-von Karman, variando as concentrações da Poliacrilamida. 27

Figura 1.6 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ com o tempo. Figura tomada de Pereira, Soares e Andrade 2013. 29

Figura 1.7 – (A) Polimerização do óxido de Etileno. (B) e (C) Estrutura molecular da Poliacrilamida e Goma Xantana respetivamente.....33

Figura 1.8 – Esquema da bancada experimental. A Solução pode ser deslocada por um compressor que está conectado pneumaticamente a um vaso de pressão, ou por uma bomba centrífuga que utiliza o vaso de pressão como reservatório. 35

Figura 2.1 – Reômetro *Haake Mars II*, utilizado para medir as viscosidades. 37

Figura 2.2 – Desenho técnico da bancada de redução de arraste da Universidade Federal do Espírito Santo. 40

Figura 2.3 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução e fazer testes preliminares de $\boldsymbol{DR}$. 43

Figura 2.4 – Teste feito no reômetro para determinar o tipo da água a utilizar. 47

Figura 2.5 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de PEO. 49

Figura 2.6 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de PAM. 49

Figura 2.7 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de XG. 50

Figura 3.1 – Validação da bancada experimental para água filtrada.....55

Figura 3.2 – Resultado de repetitividade para avaliar a precisão dos experimentos. 56

Figura 3.3 – Análises de $\boldsymbol{DR}$ no reômetro para as diferentes concentrações de PEO. 57

Figura 3.4 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ com o $\boldsymbol{Np}$. Efeito da concentração para uma solução de PEO.....59

Figura 3.5 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ com $\boldsymbol{Np}$. Efeito da concentração para uma solução de PAM. 61

Figura 3.6 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ com o $\boldsymbol{Np}$. Efeito da concentração para uma solução de XG. 61

Figura 3.7 – Comparação de $\boldsymbol{DR}$ variando as concentrações de $\mathbf{25}$ ppm e $\mathbf{50}$ ppm, para soluções de PEO, PAM e XG.....62

Figura 3.8 – Comparação de $\boldsymbol{DR}$ variando as concentrações de $\mathbf{75}$ ppm e $\mathbf{100}$ ppm, para soluções de PEO, PAM e XG.....63

Figura 3.9 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ para os diferentes polímeros quando é passado por uma bomba centrífuga. 65

Figura 3.10 – Variação de $\boldsymbol{DR}$ com o número de passes. Efeito da massa molecular para uma solução de PEO. 66

Figura 3.11 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o PEO. 68

Figura 3.12 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o PAM. 68

Figura 3.13 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o XG.....69

Figura 3.14 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de PEO. 72

Figura 3.15 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de PAM. 73

Figura 3.16 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de XG. 74

Figura 3.17 – Variação da vazão e queda da pressão durante o transcorrer do teste para as três soluções em estudo.....75

Figura 3.18 – Degradação das soluções de PEO durante o transcorrer do teste. 77

Figura 3.19 – Degradação das soluções de PAM durante o transcorrer do teste. 77

Figura 3.20 – Desaglomeração das soluções de XG durante o transcorrer do teste. 78

Figura 3.21– Ajuste dos valores de $\boldsymbol{DR'}$ para as soluções de PEO. 81

Figura 3.22 – Ajuste dos valores de $\boldsymbol{DR'}$ para as soluções de PAM. 81

Figura 3.23 – Ajuste dos valores de $\boldsymbol{DR'}$ para as soluções de XG. 82

Figura 3.24 – Mistura de PEO com XG para concentrações de $\mathbf{100}$ ppm. 83

Figura 3.25 – Mistura de PEO com XG para concentrações de $\mathbf{200}$ ppm. 84

Figura 3.26 – Valores da vazão obtidos na mistura de PEO com XG para $\boldsymbol{c} = \mathbf{100}$ ppm. 85

Figura 3.27– Valores da queda de pressão obtidos na mistura de PEO com XG para $\boldsymbol{c} = \mathbf{100}$ ppm. 85

Figura 3.28 – Mistura da PAM com XG para concentrações de $\mathbf{100}$ ppm e $\mathbf{200}$ ppm. 86

LISTA DE SÍMBOLOS

FENE-P	*Finitely Extensible Nonlinear Elastic – Peterlin*
PAM	poliacrilamida
PEO	óxido de polietileno
XG	goma xantana
a	comprimento de um monômero
a_{dg}	distância do rotor ao fundo do copo (m)
CNT	nanotubos de carbono
c	concentração polimérica (ppm)
c^*	concentração de "*overlap*" (ppm)
DLS	espalhamento dinâmico de luz
DNS	simulação numérica direta
D_R	razão de arrasto – $D_R = \Delta p / \Delta p_0$
DR	coeficiente de redução de arrasto – $DR = 1 - f/f_0$
DR_{asy}	valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto
$DR_{máx}$	valor máximo do coeficiente de redução de arrasto
$DR_{mín}$	valor mínimo do coeficiente de redução de arrasto
DR'	coeficiente da redução de arrasto relativa – $DR' = DR(t)/DR_{máx}$

d	diâmetro da tubulação
$d_{máx}$	máximo desvio aceitável
f	fator de atrito de Darcy do escoamento newtoniano
f_0	fator de atrito de Darcy do escoamento não-newtoniano
f_{Virk}	fator de atrito de Virk
G'	módulo de armazenamento (Pa)
G''	módulo de dissipação (Pa)
K	fator geométrico
K_B	constante de Boltzman
L_0	comprimento do rotor (m)
l	comprimento da seção de teste (m)
LDR	mínima redução de arrasto
M_v	massa molecular viscosimétrica média (g/mol)
M_{vs}	massa molecular crítica
MDR	máxima redução de arrasto
N	número de monômeros que formam uma molécula
Np	número de passes da solução pela bancada experimental
n	rotação (rpm)
p_{in}	pressão de entrada estabelecida no vaso de pressão (Pa)
p_{atm}	pressão atmosférica (Pa)
Q	vazão do escoamento.

$\vec{q}$	distância desde o inicio até o fim da cadeia molecular
$\vec{R}$	raio médio (m)
R_1	raio interno do copo (m)
R_2	raio interno do rotor (m)
R_3	raio externo do rotor (m)
R_4	raio externo do copo (m)
Re	número de Reynolds – $Re = \rho \bar{u} d / \eta$
S	amostras de um conjunto de dados
t_a	tempo de assíntota (s)
t_d	tempo de desenvolvimento (s)
t_r	tempo de resistência (s)
T_z	tempo de relaxação do polímero (s)
T_{abs}	temperatura absoluta (K)
T_{dg}	torque na geometria com fenda dupla (N.m)
u	velocidade linear média (m/s)
u_T	velocidade na parede (m/s)
U^+	velocidade média normalizada
$\dot{\gamma}$	taxa de deformação média (1/s)
$\dot{\gamma_w}$	taxa de deformação na parede (1/s)
δ	razão entre os raios da geometria

η	viscosidade cisalhante da solução (Pa.s)
η_0	viscosidade à taxa de cisalhamento zero (Pa.s)
$[n]$	viscosidade intrínseca (dL/g)
ρ	massa específica (kg/m³)
τ	tensão de cisalhamento nominal (Pa)
τ_w	tensão de cisalhamento na parede (Pa)
ω	velocidade angular do rotor (rad/s)
$W_{e\tau}$	número de Weissenberg
ΔP	gradiente de pressão da solução
ΔP_0	gradiente de pressão do solvente
ΔP_{Total}	queda total de pressão através da bancada experimental
σ	desvio padrão
λ_1	constante do modelo de degradação $[k]^{3/2}$
λ_2	constante do modelo de degradação $[mol/g]$
λ_3	constante do modelo de degradação
λ_4	constante do modelo de degradação
λ_5	constante do modelo de degradação
λ_6	constante do modelo de degradação
α	parâmetro do modelo de degradação
β	parâmetro do modelo de degradação
γ	parâmetro do modelo de degradação

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **VI**

RESUMO ..... **VII**

ABSTRACT ..... **IX**

LISTA DE FIGURAS ..... **X**

LISTA DE SÍMBOLOS ..... **XIII**

SUMÁRIO ..... **XVII**

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO **19**

1.1 Motivação 19

1.2 Estado da arte 21

1.3 Caracterização do problema 34

CAPÍTULO 2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL **36**

2.1 Equipamentos 36

2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto 36

2.1.2 Reômetro 36

2.1.3 Instrumentos de medição da massa dos polímeros e da água 37

2.2 Descrição dos testes 38

2.2.1 Procedimento para realizar os testes no aparato experimental 38

2.2.2 Medição da viscosidade 42

2.3 Preparo e caracterização das soluções 45

2.3.1 Análises da água 46

2.3.2 Método de mistura 48

2.3.3 Tempo total de mistura 48

2.3.4 Condições de estoque da amostra 51

2.4 Preparação das amostras 51

2.5 Critério estatístico para rejeição dos dados atípicos 52

CAPÍTULO 3 RESULTADOS 54

3.1 Resultados preliminares.....54

3.2 Influências da concentração e da massa molecular do polímero no fenômeno da redução de arraste absoluta.....58

3.2.1 Influência da redução de arraste (DR) no fator de atrito 67

3.2.2 Comportamento da vazão e queda de pressão através da seção de teste 70

3.3 Redução de Arrasto Relativa 76

3.3.1 Função de decaimento para o ajuste da redução de arrasto relativa 79

3.4 Redução de arrasto com mistura de polímeros 82

CAPÍTULO 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....91

ANEXOS 98

APÊNDICE.....101

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A redução de arrasto por adição de polímeros é o fenômeno mediante o qual se reduz a perda de energia em escoamentos turbulentos. Isso ocorre quando se dilui pequenas quantidades de aditivos em um solvente, como foi observado inicialmente por Forrest e Grierson (1931), relato que não é percebido com a devida importância, Mysels (1949) e Toms (1948), sendo este último o primeiro em reportar o fenômeno. Toms observou experimentalmente que adicionando longas cadeias de polímeros (polimetilmetacrilato) ao solvente monoclorobenzeno poderia reduzir o arrasto do escoamento turbulento, que era passado através de tubulações estreitas retas. A partir daí foram muitas as investigações teóricas e práticas realizadas para entender melhor o fenômeno.

Diversos aditivos têm sido utilizados para estudar a redução de arrasto, entre os quais podem-se destacar: bolhas de gás, polpa de papel, fibra (asbestos), surfactantes, polímeros, etc. Sendo os polímeros e surfactantes os mais utilizados para reduções de perda de carga.

Uma das aplicações com maior sucesso até os dias atuais é o aumento da vazão no transporte de petróleo bruto na “Trans-Alaska Pipeline” com 119,4 cm de diâmetro e 1287 km de comprimento. Segundo Burger e Chorn (1980), tem-se uma redução de perda de carga da ordem de 30% quando é adicionado 1 ppm de aditivo de elevado peso molecular a jusante da estação de bombeamento. A redução de arraste por adição de polímeros (DR) tem tido grande sucesso em outros importantes oleodutos, como: Iraque-Turquia, Estreito de Bass na Austrália, extração de petróleo no mar em Mumbai (Nijs, (1995)), mar do norte (Dujmovich e Gallegos, (2005)) e também em linhas de produtos terminados de hidrocarbonetos (Motier e Carreir, (1989)). As aplicações não só se limitam ao setor petrolífero, há também diversas áreas de

aplicação do fenômeno, como: sistemas de combate a incêndio (Fabula, (1971) e Figueredo e Sabadini, (2003)) onde seu principal objetivo é minimizar a energia necessária para bombear a água. Na Figura 1.1 se ilustra a diferença no alcance do jato para uma solução com e sem aditivo. O uso de aditivos para aumentar a vazão da água em hidrelétricas e sistemas de irrigação tem sido outra aplicação com grande sucesso (veja Singh *et al.* (1985)). Devido a maior degradação do polímero em regiões de altas taxas de cisalhamento, como em bombas, o polímero não é adequado para utilizar em sistemas de recirculação de fluxo. A área da medicina é outro campo de bastante interesse, onde se tem pesquisado a supressão de aterosclerose (Mostardi *et al.* (1978); Unthank *et al.* (1992)) e prevenção de letalidade do choque hemorrágico (Kameneva *et al.* (2004)). Como acontece nas diversas aplicações, no campo da medicina há uma boa oportunidade de exploração de substâncias vegetais e animais que podem contribuir como aditivos redutores de arrasto no corpo humano onde, além de desempenhar um ótimo trabalho, há maior possibilidade de existir menores efeitos colaterais em comparação com alguns medicamentos utilizados atualmente.

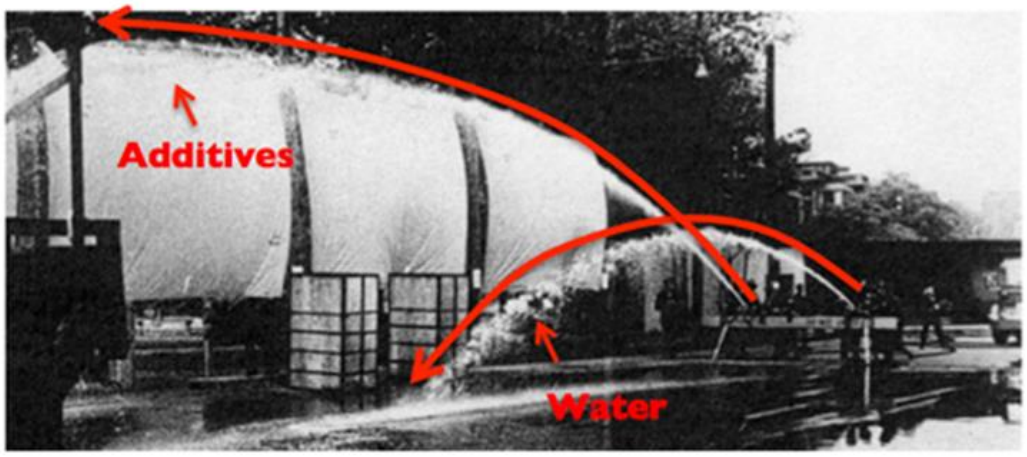


Figura 1.1 – Diferença do jato de água para uma solução com e sem aditivos. Fonte desconhecida.

Como destacado, tem havido varias aplicações práticas desde que foi descoberto o fenômeno, já que é um método eficiente, que protege o meio ambiente (melhorando a eficiência na utilização de energia) e os custos para a aplicabilidade do fenômeno são baixos. Em comparação com outras técnicas de redução de perda de energia, tais como a imposição de fortes campos magnéticos ao escoamento e a produção

de ranhuras ou rugosidades na parede interior das tubulações, a redução de arrasto por adição de polímeros tem despertado maior interesse por sua efetividade e facilidade de operação.

A maior limitação em redução de arraste é a perda de eficiência do fenômeno devido à degradação irreversível do polímero, que é causado pelas intensas forças extensionais geradas pelo escoamento turbulento. Essa desafiante desvantagem vem sendo estudada por grande quantidade de cientistas que têm reportado que a degradação do polímero depende de diferentes parâmetros, entre os quais se destacam: peso molecular, número de Reynolds, concentração do aditivo, qualidade do solvente e temperatura. Recentemente, tais parâmetros têm sido estudados por procedimentos experimentais, como através de aparatos cilíndricos rotatórios (veja Sohn *et al.* (2001), Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014)). Apesar do fenômeno estar sendo largamente estudado, existem diferentes aspectos que ainda precisam ser analisados.

O presente trabalho analisa através de um método experimental o fenômeno da redução de arraste para soluções aquosas de três diferentes polímeros: Óxido de polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG), (as duas primeiras moléculas flexíveis e a outra molécula rígida). São estudados alguns parâmetros que influenciam na degradação do polímero, como: Massa molecular, M_v, concentração do polímero, c, e número de Reynolds, Re assim como também é analisada a perda de eficiência de DR que pode ser ocasionada pela degradação ou desaglomeração das cadeias poliméricas. Para tal estudo é utilizado uma bancada de tubulações estreitas retas, por onde a solução é deslocada por um compressor que permite manter a pressão de entrada constante ao longo do experimento.

1.2 Estado da arte

O fenômeno da redução de arrasto tem atraído a atenção, por mais de 60 anos, de pesquisadores de diferentes disciplinas, como: química, turbulência, reologia e meio ambiente. Seu estudo é complexo, entre vários aspectos, destaca-se que só ocorre em escoamentos turbulentos quando é adicionado aditivos. A solução então se comporta como um fluido não newtoniano.

Uma das primeiras reportagens da redução de arrasto em escoamentos turbulentos é atribuída a Forrest e Grierson (1931), mas naquela época o fenômeno não recebeu a devida atenção, (os autores utilizaram fibras de polpa de madeira diluídas em água). Mysels (1949) foi o primeiro a observar o fenômeno de DR por adição de polímeros. Ele evidenciou que dissolvendo "*aluminium disoap*" (um surfactante aniônico) em gasolina, poderia diminuir o arraste do fluxo mantendo-se fixa a vazão. Toms (1948) reportou que diluindo soluções poliméricas de alto peso molecular (polimetilmetacrilato em monoclorobenzeno) reduzia o atrito drasticamente, além disso, também observou que o fenômeno estava associado aos escoamentos turbulentos e que para um gradiente de pressão constante na tubulação, a vazão poderia aumentar significativamente quando o aditivo era adicionado. Toms foi o primeiro a reportar o efeito da adição de polímeros no DR, fenômeno que mais tarde foi denominado como "*Toms effect*". Savins (1964) foi o primeiro a utilizar o termo "redução de arrasto" e definiu o DR em função dos gradientes de pressão da solução e do solvente quando eram medidos na mesma tubulação e na mesma vazão.

$$D_R = \frac{\Delta P}{\Delta P_0}. \tag{1}$$

Sendo ΔP_0 e ΔP os gradientes de pressão do solvente e solução, respetivamente. Assim o autor propõe uma definição de redução de arrasto em função das pressões. Desta forma, pode-se dizer que uma solução é redutora de arrasto se sua relação de arrasto D_R é inferior a 1. Em termos porcentuais,

$$\%DR = (1 - D_R) * 100. \tag{2}$$

Lumley (1969) expressou a redução de arrasto em função dos fatores de atrito do solvente e da solução. Definição que é largamente utilizada, definida como:

$$\%DR = \frac{f - f_0}{f} * 100. \tag{3}$$

Onde f e f_0 são os fatores de atrito do escoamento newtoniano e não-newtoniano respetivamente, medidos no mesmo Re.

A redução de arrasto por adição de polímeros tem sido amplamente estudada em soluções aquosas (Virk, Mickley e Smith (1970), Horn e Merrill (1984) e Pereira e Soares (2012)). Na prática, a redução de arraste não é mantida constante indefinidamente, pois ela diminui devido à quebra da estrutura molecular que é gerada pelas tensões cisalhantes e extensionais do escoamento (Den Toonder *et al.* (1995)). Pesquisas têm identificado fatores que influenciam fortemente na degradação, como: a concentração, o tipo de solvente, a temperatura, o número de Reynolds, o tipo de polímero (flexibilidade, massa molecular, composição química) e a arquitetura das plantas. Há algumas hipóteses acerca do mecanismo físico da redução de arrasto por adição de aditivos, mas as teorias ainda não são completamente aceitas.

As teorias que abordam as análises da redução de arraste podem ser divididas em duas linhas que estão baseadas nos efeitos do esticamento do polímero no escoamento. A primeira linha atribui a redução de arrasto aos efeitos viscosos (Lumley (1969) e L'vov *et al*. (2004)), enquanto a segunda aos efeitos elásticos (Joseph (1990) e Tabor & de Gennes (1986)). O argumento básico da explicação da teoria viscosa consiste no aumento da viscosidade efetiva, que é produzida pelo esticamento do polímero no escoamento turbulento. Acredita-se que inicialmente o polímero é esticado ao lado de fora da subcamada viscosa, na camada de transição, (onde as tensões de Reynolds e as tensões viscosas têm a mesma ordem de grandeza), região na qual as taxas de deformação e os campos de vorticidade são adequados para causar uma elevada extensão dos polímeros, o que resulta no grande incremento da viscosidade extensional. Lumley (1973) argumenta que o aumento da viscosidade fora da subcamada viscosa, suprime as flutuações turbulentas, incrementando a espessura da camada de transição, em direção radial, o que ocasiona a redução do arrastro sofrido pela solução. Por outro lado Tabor & de Gennes (1986) argumentam que a teoria viscosa não explica o fenômeno, porque as taxas de cisalhamento próximas à parede flutuam em tempo e em espaço e podem produzir só um esticamento parcial dos polímeros. Então os autores propõem que a energia elástica armazenada pelos polímeros parcialmente esticados tem uma

importante função no DR, e o incremento da viscosidade é pequeno e irrelevante. A teoria elástica postula que o efeito do polímero é importante nas pequenas escalas do escoamento turbulento, onde a energia elástica armazenada pelos polímeros parcialmente esticados se torna comparável com a energia cinética turbulenta na camada de transição. A cascata de Kolgomorov é finalizada prematuramente, (como se mostra na Figura 1.2). Acredita-se que as escalas abaixo deste ponto de quebra têm um comportamento elástico. Afirma-se que esse efeito produz um aumento da espessura da camada de transição e consequentemente uma diminuição da região turbulenta.

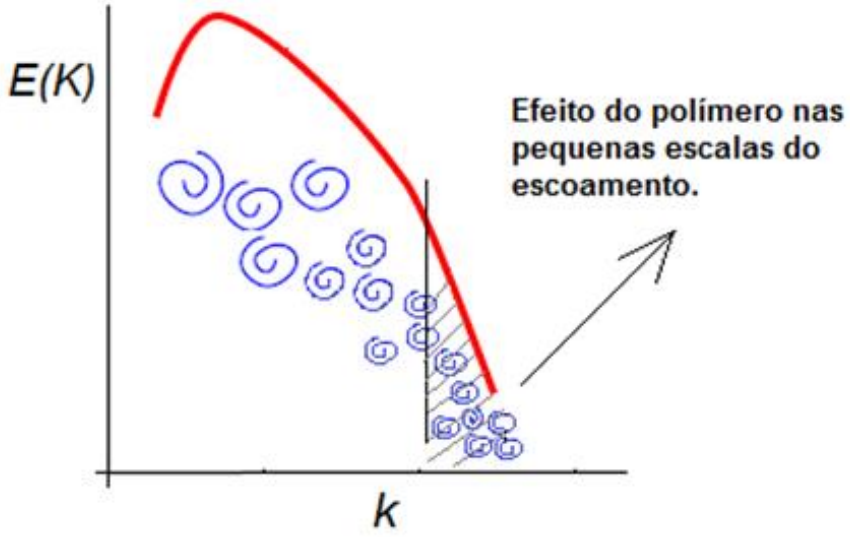


Figura 1.2 – Espectro de energia E(k) versus número de ondas (K). O efeito elástico ocorre só nas pequenas escalas do escoamento turbulento.

Um trabalho que expõe uma teoria bastante interessante da interação dos polímeros flexíveis com as estruturas do escoamento turbulento é o de Dubief *et al.* (2004). Os autores apresentam uma teoria para a ação dos polímeros sobre a turbulência no fenômeno de DR através de simulações numéricas realizadas em um canal, utilizando o modelo FENE-P (*"finitely extensible nonlinear elastic - Peterlin")*. Considera-se que os polímeros armazenam e cedam energia de uma forma organizada e cíclica. O acúmulo da energia acontece ao redor dos vórtices próximos à parede, onde inicialmente o polímero estava encolhido. Este é impulsionado pelo movimento dos fluxos à camada de transição onde posteriormente estica, interage

com o vórtice, ganhando e armazenando energia, que depois ao ser enviado novamente para as proximidades da parede, encolhe, e cede energia na mesma direção do escoamento como se representa na Figura 1.3. Os polímeros encolhem na região $y^+ = 5$, (ponto de localização das linhas de corrente, próximo à parede) devido à redução da energia cinética turbulenta por dissipação viscosa. Nos pontos $E_\alpha < 0$ e $E_x > 0$ são onde se amortecem e se intensificam a energia levada pelas flutuações de velocidade, respetivamente. (E indica a relação entre o polímero e os vórtices turbulentos, nomeado pelos autores como o "trabalho do polímero", x se refere à direção principal do escoamento e α pode ser qualquer direção).

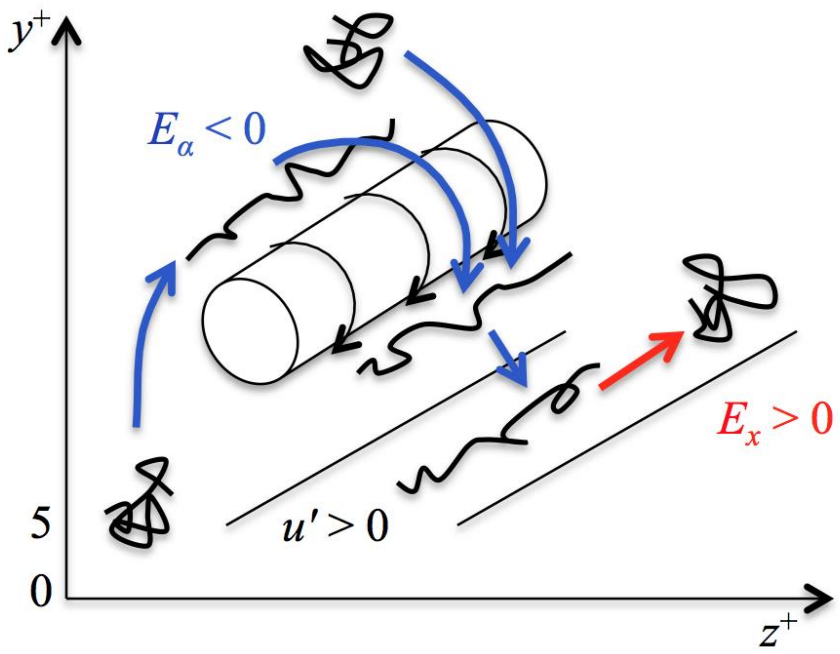


Figura 1.3 – Interação do polímero elástico com o escoamento turbulento. Figura tomada do artigo Dubief *et al.* (2004).

As investigações feitas em redução de arraste têm caracterizado dois regimes (Warholic, Massah e Hanratty (1999)) conhecidos como mínima redução de arrasto (LDR-*Low Drag Reduction*) e máxima redução de arrasto (MDR-*Maximum Drag Reduction*). O LDR está relacionado aos primeiros instantes onde ocorre a redução de arrasto, conhecido como *"onset"*. Basicamente o DR não ocorre até que certa taxa de cisalhamento na parede ou taxa de deformação é excedida. O início da redução de arraste é justificado com base nas teorias explicadas anteriormente. Para a teoria viscosa acredita-se que o "*onset*" ocorre quando a relação entre a escala de comprimento do polímero (raio de giração) e a escala de comprimento

turbulenta atinge certo valor (Virk, Mickley e Smith (1967)). Na teoria elástica, há um critério de tempo para que haja um indício de DR (Hershey & Zankin (1967), Lumley (1969)). O critério precisa que o tempo de relaxação do polímero seja maior que um tempo característico do escoamento turbulento próximo à parede $T_z > \frac{\eta}{\rho u_\tau^2}$, onde T_z é o tempo médio que toma um polímero esticado para retornar a encolher (Zimm 1956), $\eta\ e\ \rho$ são respetivamente a viscosidade e massa específica da solução, $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ é a velocidade de parede e τ_w é a tensão de cisalhamento também na parede. A Figura 1.4 apresenta o polímero no estado do repouso (encolhido) que se estica pelo cisalhamento. Nota-se que o vetor $\vec{q}$ (que está desde o início até o fim da cadeia polimérica) aumenta consideravelmente quando um fluxo é imposto.

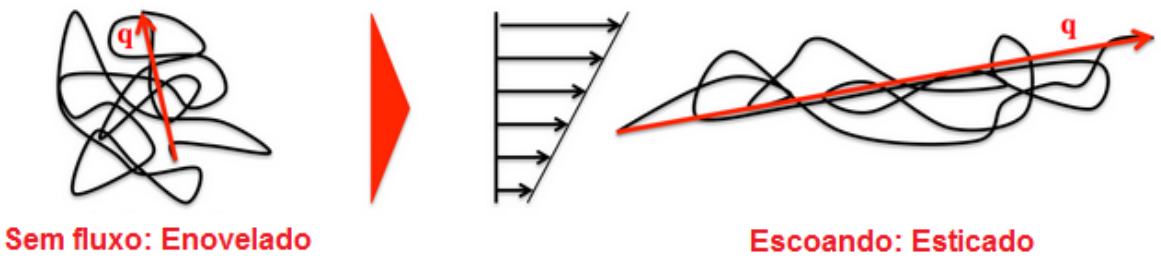


Figura 1.4 – Estados do polímero ao repouso e quando é submetido a uma taxa cisalhante.

Para polímeros lineares flexíveis em solução, o tempo de relaxação pode ser aproximado por $T_z \approx \frac{\mu_s (N^{3/5} a)^3}{K_B T_{abs}}$, onde N é o número de monômeros que formam a molécula, a é o comprimento de um monômero, K_B é a constante de Boltzman, e T_{abs} é a temperatura absoluta da solução (equação de Flory (1971)). Assim, de acordo com o critério de tempo, o início de DR ocorre quando a relação entre a escala de tempo do polímero e a escala de tempo do escoamento turbulento próximo à parede, definido como número de Weissenberg na parede ($w_{e\tau} = T_z \rho u_\tau^2/\eta$ é da ordem da unidade, ou seja, $w_{e\tau} \approx 1$. Observa-se que o $w_{e\tau}$ apresentado na equação por Hershey & Zankin (1967) não depende da concentração, o que limita um pouco o propósito da equação, pois tem sido demostrado claramente que o início de DR depende da concentração, (veja Nadolink (1987) e Pereira e Soares (2012)).

Por outro lado, a máxima redução de arrasto (MDR), também conhecida como assíntota de Virk (Virk, Mickley e Smith (1970)), é o valor máximo de DR que pode ser atingido. Este limite pode ser alcançado de duas formas; a primeira delas é

fixando o Re do escoamento e aumentando progressivamente a concentração até um ponto de saturação, ou seja, por mais que se adicione polímero ao solvente, não vai ser observada maior variação no DR. Em outras palavras, é alcançado um patamar de DR. Similarmente para uma concentração fixa, quando o Re é incrementado, se alcança um máximo valor de DR. Na Figura 1.5, ilustra-se em coordenadas Prandtl-von Kármán os valores de DR máximos obtidos quando se aumenta a concentração de Poliacrilamida, com massa molecular de 5×10^6 g/mol. Nota-se que ainda precisa aumentar a concentração para atingir o MDR.

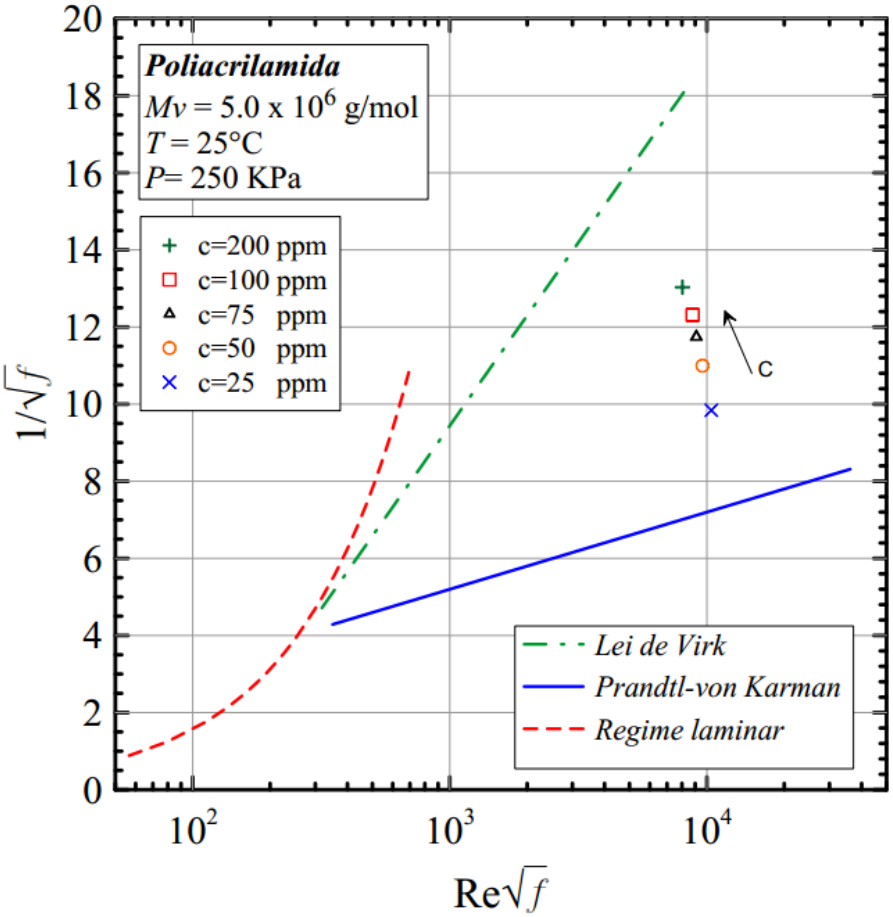


Figura 1.5 – Máxima redução de arrasto em coordenadas Prandtl-von Karman, variando as concentrações da Poliacrilamida.

Segundo White e Mungal (2008), tanto o MDR como o início da redução de arraste tem dividido a interpretação dos pesquisadores em torno da teoria viscosa e elástica. Uma das explicações que indicam os autores afirma que o MDR acontece quando os tensores de Reynolds são fortemente diminuídos e os mecanismos que sustentam a

turbulência são especialmente conduzidos pelas flutuações das tensões poliméricas (Min *et al.* (2004), Ptasinski *et al.* (2001) e Warholic, Massah e Hanratty (1999)).

Como se pode notar, os principais aspectos de estudo em redução de arrasto estão direcionados às análises das moléculas flexíveis, mas, o que acontece quando se utiliza uma molécula rígida em vez de uma flexível? Qual teoria de DR descreve o comportamento destas macromoléculas? São perguntas que ainda precisam ser respondidas. Futuramente com a ajuda das simulações numéricas diretas (DNS) e métodos experimentais óticos, como: espalhamento dinâmico de luz (DLS), (que permite observar e analisar a estrutura macromolecular da cadeia polimérica) será possível dar luz a estas interrogações. O estudo de polímeros rígidos, como a Goma Xantana, tem sido realizado por diferentes autores (Kenis (1971) e Bewersdorff e Singh (1988)), onde, assim como os polímeros flexíveis, o DR aumenta em função da concentração e da massa molecular, mas, como mencionado anteriormente o mecanismo de redução de arraste é diferente em comparação à macromolécula flexível. Segundo Virk, Sherman e Wagger (1997) o DR pode ser dividida em dois mecanismos: Tipo A e Tipo B. O primeiro está associado com os polímeros que permanecem encolhidos em repouso. Estes aditivos precisam de certa taxa de cisalhamento para esticar e começar a reduzir o arrasto. Por outra lado, o segundo mecanismo se refere às macromoléculas que se mantém esticadas no repouso, no qual se de repente forem submetidas a uma taxa de cisalhamento, não haverá mudanças na conformação molecular. (Cita-se como exemplo, o polissacarídeo de interesse neste estudo, a Goma Xantana). A vantagem dos polímeros polissacarídeos é a grande resistência mecânica à degradação quando é comparado com um polímero flexível da mesma massa molecular, porém são sensíveis à degradação biológica. Pesquisas de XG na área de DR têm sido bastante interessantes e contributivas, principalmente por mostrar alta resistência à degradação. Sohn *et al.* (2001), usando uma geometria rotativa ressaltam a estabilidade da cadeia polimérica de XG em relação à degradação e mostram que o XG apresenta melhores resultados com o aumento da temperatura (na faixa de $30\ ºC\ a\ 50\ ºC$) para soluções com água deionizada. A degradação do polímero é menor para soluções que contêm sal, do que para soluções com água deionizada. Recentemente, no trabalho apresentado por Pereira, Andrade e Soares (2013), analisa-se o efeito da concentração, massa molecular, temperatura e número de

Reynolds para o XG que é comparada com os polímeros flexíveis PEO e PAM. Os autores analisam a variação de DR ao longo do tempo desde os primeiros instantes em que ocorre o fenômeno até o momento no qual se atinge o estado estável da cadeia polimérica, como se ilustra na Figura 1.6.

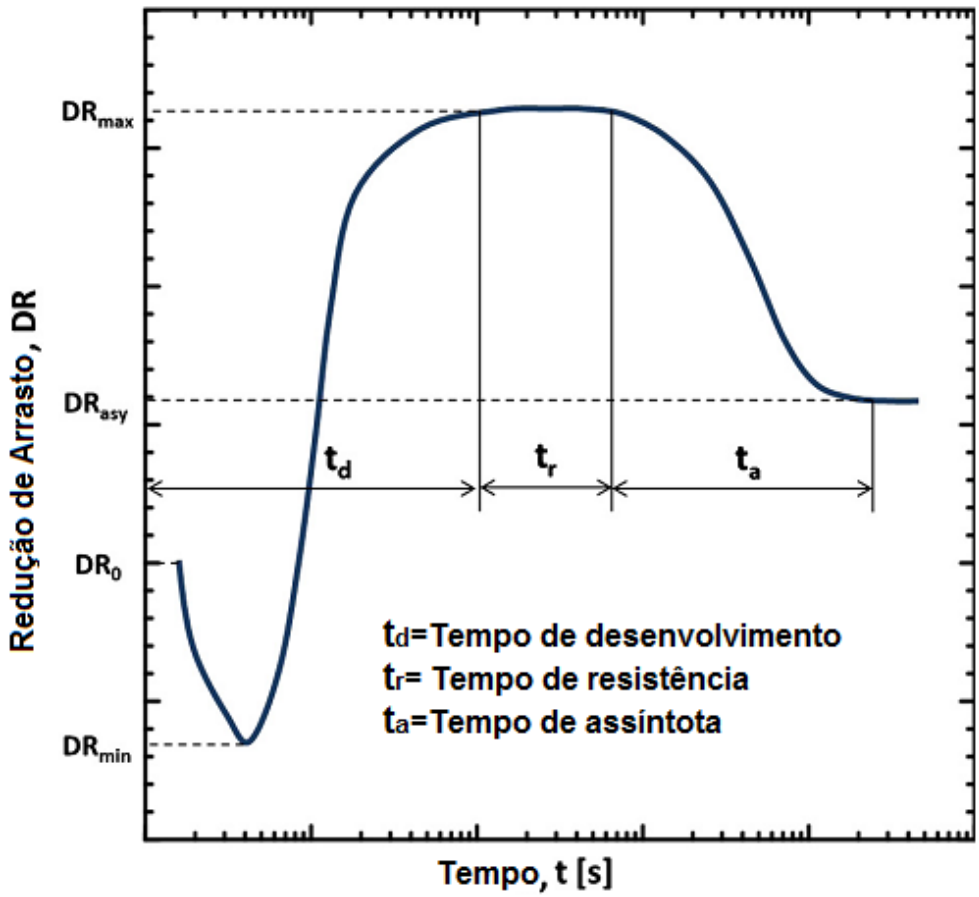


Figura 1.6 – Variação de DR com o tempo. Figura tomada de Pereira, Soares e Andrade 2013.

Esta figura pode ser construída fazendo um seguimento da redução de arraste ao longo de um trecho de tubulação reta colocando-se diversos medidores de pressão, depois que é adicionado o polímero, ou também, usando-se uma geometria rotativa. Nos primeiros instantes do teste, logo depois que é injetado o polímero ao escoamento, o DR diminui desde DR_0 até $DR_{mín}$ antes de atingir o máximo nível de eficiência, chamado pelos autores de $DR_{máx}$. Dimitropoulos *et al.* (2006) reportaram que provavelmente esse efeito de redução de arrasto negativa esteja associado à remoção de energia do escoamento médio, devido ao esticamento abrupto das macromoléculas, o que provoca o aumento da viscosidade extensional e como consequência aumento do fator de atrito da solução. Após este efeito o DR passa de

seu limite mínimo para o limite máximo, supõe-se que este ocorre quando um suficiente número de macromoléculas, que estão em um ciclo de estica-encolhe, consegue interagir com as estruturas turbulentas em um estado de equilíbrio. Esse tempo para atingir $DR_{máx}$ é chamado pelos autores de tempo de desenvolvimento, t_d (veja Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014)). Logo após t_d é observado um valor constante de $DR_{máx}$ por um intervalo de tempo, denominado como tempo de resistência, t_r. Finalmente depois deste tempo, o DR começa a diminuir gradualmente até atingir um valor estável, assintótico, DR_{asy}. (Esse decrescimento de DR sucede pela degradação mecânica da cadeia molecular). Por outro lado, Pereira Andrade e Soares (2013), além de descrever detalhadamente o comportamento de DR com o tempo, também investigam como os diversos fatores (concentração, massa molecular e temperatura) variam com os tempos (t_d, t_r, t_a), para moléculas flexíveis e rígidas. É importante ressaltar que os testes apresentados no presente trabalho, partem desde o ponto da máxima redução de arraste ($DR_{máx}$ Figura 1.6), pois o tempo de desenvolvimento é bastante rápido, não sendo possível evidenciá-lo nos experimentos.

Polímeros são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores (os monômeros), ligadas fortemente para formar longas cadeias. Uma das mais importantes caraterísticas dos polímeros são as mecânicas. Segundo ela os polímeros podem ser divididos em três grupos: elastômeros, plásticos (rígidos e flexíveis) e fibras. (Para este estudo são empregados polímeros plásticos). Plásticos rígidos são os que à temperatura ambiente suportam um alto grau de tensão, isto é, são resistentes quando se tenta esticá-los, mas, não experimentam muita deformação antes de se romperem. Já os plásticos flexíveis não resistem tanto à deformação quanto os rígidos e por isso são mais resistentes à ruptura. Os tipos de degradação dos polímeros em relação aos agentes causantes podem ser: biológico, químico e mecânico. As degradações biológicas se referem aos microrganismos, tais como fungos e bactérias. (Este tipo de degradação pode apresentar-se no momento da diluição). A degradação química pode ocorrer na presença de metais, ácidos, oxigênio e também altas salinidades no solvente. Finalmente a degradação mecânica em redução de arrasto está relacionada às tensões cisalhantes ocasionadas por vórtices do escoamento turbulento que fazem com que a molécula seja submetida à rotação e as ações de esticamento e contração.

Como dito anteriormente, a degradação mecânica é a principal desvantagem dos polímeros, que é causada pelas tensões cisalhantes e extensionais. Segundo Paterson e Abemathy (1969), a taxa de degradação aumenta com o aumento da massa molecular. Devido a este inconveniente, não é adequado utilizar o polímero em sistemas de recirculação, pois as altas taxas de cisalhamento quebram irreversivelmente as cadeias moleculares do polímero. Nestes casos o polímero é injetado à jusante do sistema de bombeamento. Um dos trabalhos que merece destaque com referência à degradação do polímero foi apresentado nos últimos anos por Vanapalli, Islam e Solomon (2005), que reportaram a quantificação direta da massa molecular do PEO e PAM através de um método de cromatografia de permeação em gel. Foi demostrado que tanto a massa molecular quanto o raio de giração da macromolécula diminuem com o aumento do número de passes da solução pelo aparato experimental e que depois de certo número de passes estas duas variáveis em análise atingem um estado estável, consistente com o valor assintótico alcançado pela redução de arraste. Para demonstrar o que foi mencionado anteriormente, os autores trabalham em um aparato experimental composto de diferentes seções de tubulação, onde também indicam que a maior parte da degradação da solução que se apresenta nestes tipos de bancada ocorre pelo efeito de entrada. Este efeito se apresenta no momento em que a solução sai do vaso de pressão e entra na tubulação da secção principal do teste, onde são medidas as propriedades do fluido. Com o objetivo de minimizar este efeito é sugerida utilização de uma entrada cônica especial. Finalmente os autores apresentam uma expressão que envolve a taxa de deformação na parede para quebrar as macromoléculas, $\dot{\gamma}_w$, e a massa molecular crítica, M_{ws}, dada por: $\dot{\gamma}_w \propto M_{ws}^{-2,20\pm0.21}$ e $\dot{\gamma}_w \propto M_{ws}^{-2,73\pm0.18}$ para PEO e PAM respectivamente. A M_{ws} é o valor da massa molecular quando é atingido o estado estável. A M_{ws} é crítica no sentido de que não deve mudar de valor, mesmo que seja submetida a outra passagem pela bancada. Finalmente, nota-se das expressões acima mencionadas que PEO é mais susceptível à degradação do que PAM para a mesma massa molecular, e que a relação é independente da concentração de polímero. Este último destaque (M_{ws} ser independente da concentração) é contraditório com os resultados obtidos nesta pesquisa, ponto que será abordado no capítulo três. Este fato também não é condizente com os resultados de Pereira e Soares (2012) e Pereira, Andrade e Soares (2013).

Outro aspecto que merece a atenção de muitos pesquisadores é a formação de agregados em soluções diluídas utilizadas para reduzir o arrasto. Define-se a formação de agregados em soluções diluídas quando a estrutura polimérica está composta por mais de uma cadeia molecular, mas sem formar uma rede ou um gel. Shetty e Solomon (2008) através da técnica de espalhamento de luz dinâmico (*DLS*) estabeleceram uma relação para a formação de agregados em soluções de PEO com $M_v = 4 \times 10^6$ g/mol. Além disso, os autores indicam que esta função diminui com a adição progressiva de sal. Acredita-se que a adição de sal na solução pode destruir a formação de agregados nas soluções aquosas. Finalmente os autores argumentam que há uma relação entre o início da redução de arraste e a estrutura do agregado, pois a formação de agregados afeta o tempo de relaxação da solução polimérica, o que pode mudar a condição de início do DR.

É importante ainda destacar as principais propriedades dos polímeros que são empregados no presente trabalho: Óxido de polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Estes três polímeros têm sido altamente utilizados para o estudo de DR por sua boa eficiência e facilidade de uso. Ver por exemplo: Den Toonder *et al.* (1995), Sohn *et al.* (2001), Vanapalli, Islam e Solomon (2005) e Pereira, Andrade e Soares (2013). O PEO é um polímero sintético de cadeia linear flexível, solúvel em água e se encontra disponível comercialmente com várias massas moleculares. Ele é obtido por polimerização do Óxido de Etileno, que é um monômero composto por duas moléculas ligadas de CH_2 e uma de oxigênio. Em presença de um catalisador o monômero forma uma cadeia com unidades repetidas gerando o PEO. Como pode ser observado na Figura 1.7A, “N” indica o grau de polimerização ou unidades estruturais. A Poliacrilamida é uma resina acrílica solúvel em água, que é produzida pela polimerização da Acrilamida (C_3H_5NO). Assim como o PEO, os monômeros da Acrilamida são induzidos para polimerizar através da ação de iniciadores de radicais livres, obtendo-se uma longa cadeia com várias unidades repetidas de Acrilamida, (ver Figura 1.7B). A Goma Xantana (Figura 1.7C) é um polissacarídeo de alta massa molecular, produzido pelos micro-organismos “*Xanthomonas Campestris”.* A viscosidade cisalhante, que tem um comportamento altamente pseudoplástico, varia acentuadamente com a temperatura e o sal. As distintas propriedades das soluções aquosas de XG são devido a sua estrutura química rígida. O polímero é constituído por uma cadeia principal linear de glucose

com uma cadeia linear de trissacarídeos, similar à celulose. A XG se encontra em uma conformação ordenada em soluções a moderada temperatura, como descreve Bewersdorff e Singh (1988), nesta conformação, a cadeia lateral carregada de trissacarídeos se dobra através da estrutura de celulose para dar uma constituição rígida, estabilizada por ligações intermoleculares não covalentes.

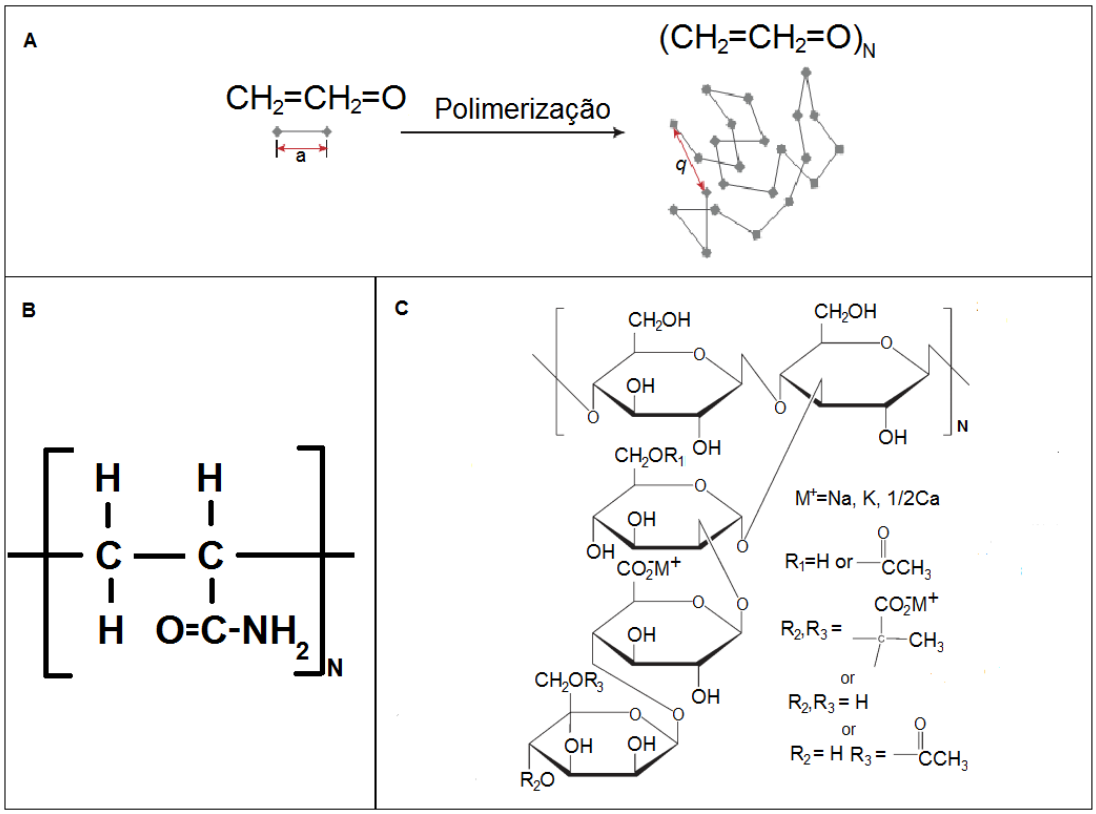


Figura 1.7 – (A) Polimerização do óxido de Etileno. (B) e (C) Estrutura molecular da Poliacrilamida e Goma Xantana respetivamente.

Felizmente muitas são as pesquisas realizadas na área de redução de arraste desde que foi reportado o fenômeno. Vejam, por exemplo, as revisões feitas por: Lumley (1969), Virk (1975), Nieuwstadt e Den Toonder (2001) White and Mungal (2008) Wang, Zakin e Shi (2011). A maioria delas tem relatado grandes avanços através de análises experimentais, outras através de simulações numéricas (veja Dimitropoulos et al. (2005)), e também, com a ajuda de técnicas especiais, como cromatografia a gel e espalhamento de luz dinâmica. Porém, o entendimento de seu comportamento (início da redução de arraste e máxima redução de arrasto) tem sido um desafio para vários pesquisadores.

1.3 Caracterização do problema

O presente trabalho estuda o processo de degradação mecânica de polímeros de alta massa molecular no fenômeno da redução de arraste. Utiliza-se uma bancada que é constituída de tubulações estreitas retas por onde é conduzida a solução. Para evitar a degradação fora da seção de teste, a solução é deslocada por um compressor que está conectado pneumaticamente a um vaso de pressão. Também são feitos outros testes, impulsionando a solução através de uma bomba centrífuga (mantendo-se o mesmo Reynolds que é gerado pelo compressor) como se mostra na Figura 1.8. Desta forma avalia-se e compara-se a degradação sofrida pelos polímeros, devido ao uso destes dispositivos. Um medidor de fluxo magnético, dois medidores de pressão e diferentes termopares são instalados ao longo da tubulação para medir as propriedades físicas da solução durante o experimento.

São estudadas soluções aquosas para três polímeros diferentes: Óxido de Polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Para o PEO são utilizadas duas massas moleculares e para PAM e XG apenas uma massa molecular. Os valores das massas moleculares foram informados pelos fabricantes e medidos por Pereira e Soares (2012). Estas análises são feitas com o cálculo da viscosidade intrínseca usando a equação de Huggins (para maiores detalhes veja Flory, (1971)). É importante ressaltar que são utilizados exatamente os mesmos polímeros usados por Pereira e Soares (2012) e Pereira, Andrade e Soares (2013).

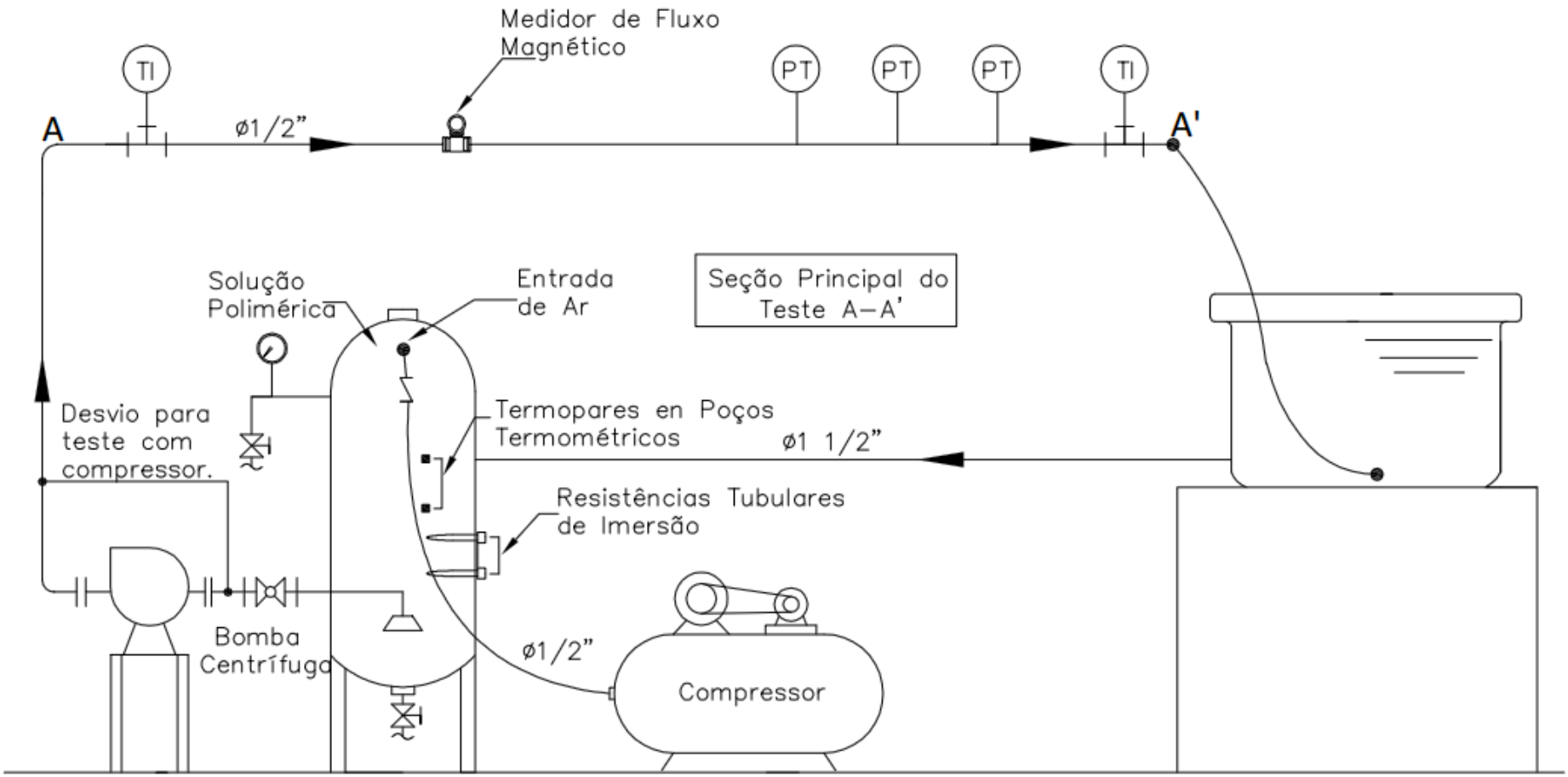


Figura 1.8 – Esquema da bancada experimental. A Solução pode ser deslocada por um compressor que está conectado pneumaticamente a um vaso de pressão, ou por uma bomba centrífuga que utiliza o vaso de pressão como reservatório.

CAPÍTULO 2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

2.1 Equipamentos

2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto

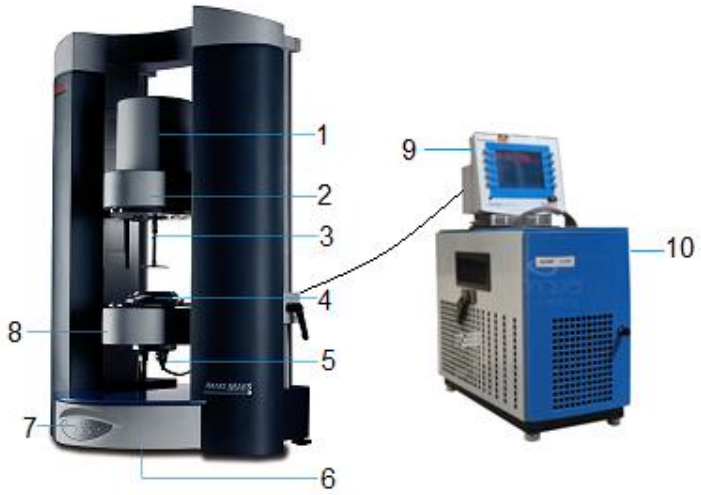
A redução de arrasto tem sido estudada por diferentes métodos experimentais através de dutos e reômetros. As geometrias rotativas têm sido bastante úteis, como reportaram: Choi e Jhon (1996), Kalashnikov (1998), Sohn *et al.* (2001), Bizotto e Sabadini (2008) e Andrade, Pereira e Soares (2014). Porém esses dispositivos não geram os regimes turbulentos que são utilizados na maioria das aplicações práticas. É por isso que muitos autores, como: Virk (1975), Bewersdorff e Singh (1988), Den Toonder *et al.* (1995), Vanapalli, Islam e Solomon (2005), Elbing *et al.* (2009) tem orientado as pesquisas ao estudo do fenômeno em escoamentos em dutos, apesar de que seus testes despendem muito mais custo e tempo, uma vez que são necessários maiores volumes de amostras para fazer os experimentos.

No presente trabalho é utilizada uma bancada composta de tubulações estreitas retas por onde é passada a solução, que pode ser deslocada por um compressor ou por uma bomba centrifuga. Os dispositivos estão conectados por meio de tubulações flexíveis e rígidas a um vaso de pressão, desenhado com paredes de chapas de aço AS-36, com capacidade volumétrica de 350 L. O diâmetro interno da tubulação na seção de teste é de 0,5″. Neste trecho de diâmetro (seção A até A’), estão conectados os transdutores de pressão estáticos, os termopares e o medidor de fluxo, como pode ser observado na Figura 1.8.

2.1.2 Reômetro

Um reômetro modelo HAAKE MARS II, fabricado pela empresa *Thermo Scientific* é utilizado para medir as viscosidades das soluções e testes preliminares de redução de arrasto. O mesmo utilizado por Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e

Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014), existente no Laboratório de Reologia da Universidade Federal do Espírito Santo. O equipamento é ilustrado na Figura 2.1, onde são observados seus principais elementos.



1. Cabeça do reômetro.
2. Estrutura para fixação da geometria do teste.
3. Geometrias de teste.
4. Copo fixo para acomodação da amostra.
5. Conector para termopar.
6. Ajuste de altura e nivelamento.
7. Painel de controle manual.
8. Estrutura para fixação do copo.
9. Tela para ajuste e indicação da temperatura.
10. Termostato com refrigeração compacto.

Figura 2.1 – Reômetro *Haake Mars II*, utilizado para medir as viscosidades.

O reômetro é conectado a um banho termostático tipo *Thermo Haake Phoenix II*, modelo P1-C50P, também fornecido pela *Thermo Scientific*, para garantir um controle preciso de temperatura durante os testes. O rotor do reômetro é acionado mediante ar comprimido, que é provido por um compressor odontológico isento de óleo CHIAPERINI, modelo MC 6 BPV RV 60L. Após o compressor, o ar passa por um sistema de filtragem e secagem por adsorção da *Bel Air*. Todos os experimentos são controlados automaticamente por um computador e os resultados são extraídos com ajuda do programa *HAAKE RheoWin* (versão 1.3).

2.1.3 Instrumentos de medição da massa dos polímeros e da água

Para a pesagem do polímero é utilizada uma balança analítica eletrônica do modelo ABT 320-4M fabricada pela empresa *KERN & Sohn GmbH*, com precisão de 1 mg. Também é usada outra balança semi-analítica de 50 kg, modelo WT 1000 classe III, com precisão de 10 g, fabricada pela empresa *WEIGHTECH*, que é utilizada para pesar a água filtrada utilizada nos experimentos. Os instrumentos de medição têm

certificado de calibração do Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (INMETRO).

2.2 Descrição dos testes

2.2.1 Procedimento para realizar os testes no aparato experimental

A bancada experimental utilizada é apresentada detalhadamente na Figura 2.2. A maioria dos testes são feitos impulsionando a solução por meio de um compressor isento de óleo, modelo MSV 12/175 tipo odontológico fabricado pela empresa *Shulz*.

O teste de redução de arrasto consiste primeiramente em depositar as soluções (volume; 150 L) em um reservatório plástico, onde posteriormente é deixado fluir lentamente por ação da gravidade (para evitar a degradação do polímero) ao vaso de pressão, através de uma tubulação de retorno de $1{,}5$”. Quando a solução está totalmente depositada no vaso, o mesmo é pressurizado por meio de um compressor de ar que se encontra conectado pneumaticamente. A pressão estabelecida de 250 KPa é mantida constante no vaso durante todo o experimento (com desvio menor à 8%). Vanapalli, Islam e Solomon (2005) indica que em equipamentos experimentais compostos por tubulações para o estudo de DR é necessário instalar uma entrada cônica para diminuir a degradação do polímero sofrida pela contração que está localizada na entrada da seção de teste. Porém, nesta pesquisa os testes foram realizados com entrada reta e os resultados são consistentes com os obtidos pelos referidos autores, para o mesmo polímero, concentração, massa molecular e número de Reynolds.

Uma válvula de esfera é aberta para dar inicio à saída da solução do vaso de pressão, então, o fluxo turbulento é passado por uma tubulação onde depois de certo trecho fica totalmente desenvolvido. Acredita-se que a adição do polímero contribui para o desenvolvimento do escoamento, pois sabe-se que estes aditivos promovem uma espécie de organização do escoamento. Porém, Draad, Kuiken e Nieuwstandt (1998) reportaram que um escoamento totalmente desenvolvido é mais difícil de se realizar em soluções poliméricas do que em um fluido newtoniano.

Então, um comprimento de entrada de $l/_d = 400$ é introduzido antes do primeiro transdutor de pressão.

De acordo com a consideração indicada anteriormente, foram instalados na seção principal do teste (A-A') os termopares tipo J (*Iope*), um medidor de vazão magnético modelo *Rosemount* 8732 (*Emerson Progress*), com incerteza de 0,5% da taxa e três transdutores de pressão estáticos modelo WTP – 4010 (Fabricado pela empresa *Warme*) com uma faixa de medida de $0\ a\ 500$ KPa (4 a 20 mA) com incerteza de medição de $0{,}0057$ mA. A distância entre as tomadas dos transdutores de pressão é de 500 mm. Para cada tomada de pressão nos três pontos citados foi perfurado um orifício de 2 mm de diâmetro. (Os outros instrumentos utilizados e suas especificações técnicas encontram-se no anexo A).

O material da tubulação onde foram instalados os instrumentos é de aço carbono de $12{,}7$ mm de diâmetro e especificamente na seção onde se encontram instalados os transdutores de pressão, (que é de 1 m de comprimento e de $12{,}7$ mm de diâmetro) foi instalado uma tubulação de aço inoxidável, na qual foi feito um processo de brunimento na superfície interna, a fim de garantir com exatidão a medida do diâmetro. Todas as tubulações estão termicamente isoladas. No vaso de pressão há também resistências tubulares de imersão, com o objetivo de manter a temperatura constante durante o experimento, porém o controle de temperatura da bancada não foi utilizado nesta pesquisa.

Quando toda a solução é passada pelo vaso de pressão até o reservatório (designado como um passe, Np), é aberta uma válvula para que a solução polimérica já um pouco degradada retorne por gravidade novamente ao vaso de pressão. Assim continua o experimento até não se observar mudança de resultado por efeito da degradação. Os valores de pressão e vazão medidos durante o experimento são aquisitados com ajuda do programa *LabView* e posteriormente são analisados estatisticamente (ver seção 2.5).

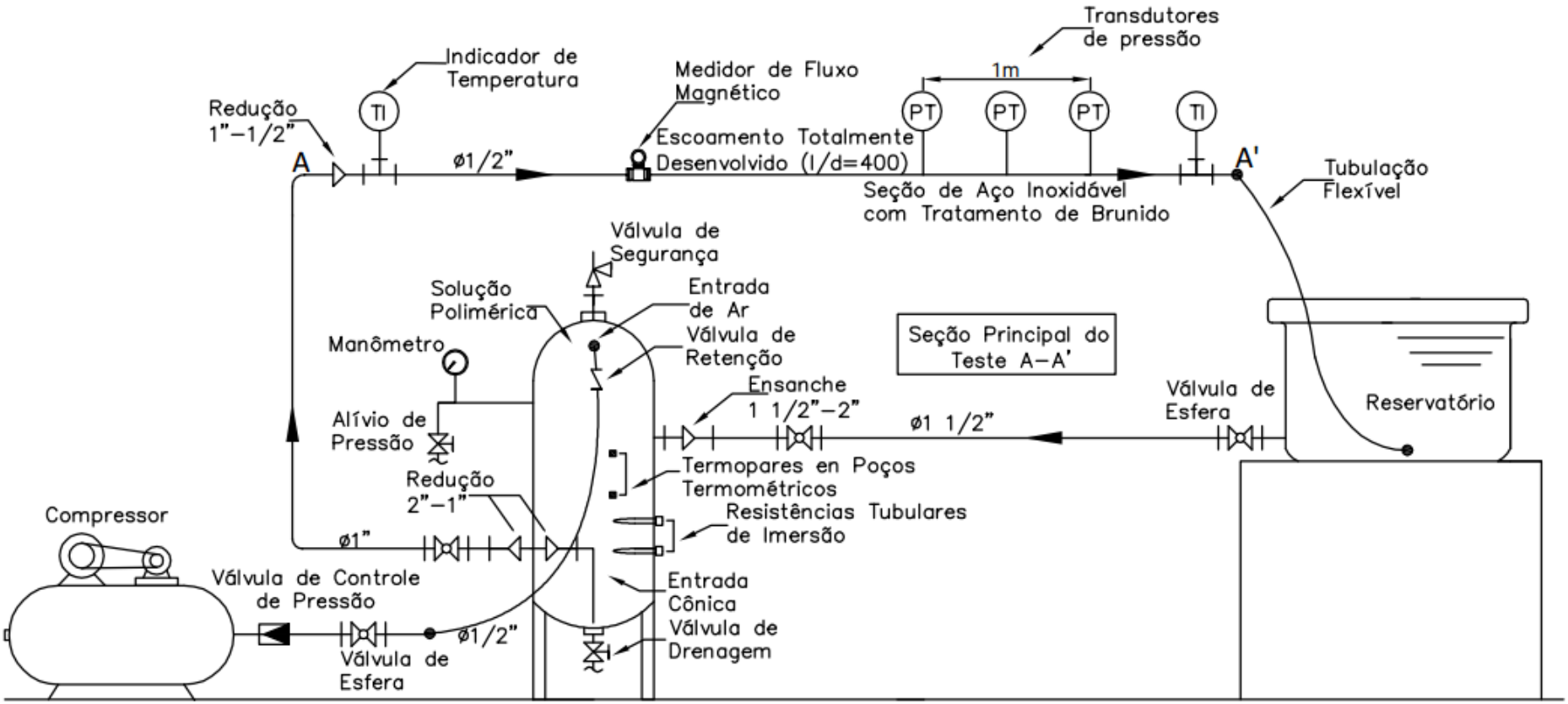


Figura 2.2 – Desenho técnico da bancada de redução de arraste da Universidade Federal do Espírito Santo.

Como foi indicado previamente, a outra forma de fazer os testes é impulsionando a solução mediante uma bomba. Nesta pesquisa é utilizada uma bomba centrífuga modelo *CAM-W6C* de um estágio, fabricada pela empresa *Dancor.* (As especificações técnicas são apresentadas no anexo A). Inicialmente os testes são feitos deslocando a solução polimérica com o compressor (como foi descrito anteriormente), de onde, entre outros dados são conhecidos os números de Reynolds atingidos para cada experimento e para cada número de passes, que são dependentes do polímero, massa molecular e concentração. Depois de terminar o teste com compressor (quarenta passes) esse mesmo número de Reynolds medido é estabelecido no supervisório de *LabView* para fazer o teste com a bomba (isto é feito com uma nova solução). O procedimento de teste é similar ao feito com compressor. O objetivo do uso da bomba é introduzir uma degradação localizada intensa e verificar a resistência dos polímeros.

Conhecidos a massa específica (ρ), a viscosidade da solução (η) (ver seção 2.2.2), a velocidade média da solução $(\vec{u})$ e com o respectivo diâmetro interno da tubulação (d), o número de Reynolds é calculado através da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} d}{\eta}. \tag{4}$$

Através da diferença de pressão na seção de teste, $\frac{\partial p}{\partial x}$, com diâmetro constante, onde o fluxo é totalmente desenvolvido, o fator de atrito de Darcy da bancada experimental é calculado pela seguinte equação:

$$f_D = \frac{2d}{\rho \bar{u}^2}\left(\frac{\Delta p}{l}\right). \tag{5}$$

Para determinar a porcentagem da redução de arraste, $\%DR$, usa-se a definição de Lumley (1969) como exposta na Eq. (3): $\%DR = (1 - f_0/f) * 100$. Onde f_0 e f são o fator de atrito da solução polimérica e do solvente, respetivamente.

A perda de eficiência pode ser medida diretamente através da redução de arrasto relativa:

$$DR' = DR(t)/DR_{máx}. \quad (6)$$

Onde $DR(t)$ é a redução de arrasto ao decorrer do teste e $DR_{máx}$ é a máxima redução de arrasto observada durante o primeiro passe, quando o polímero ainda não está degradado.

Outros parâmetros de grande importância são analisados, como: o ganho de vazão, taxa de cisalhamento na parede e a redução da queda da pressão ao longo da tubulação.

2.2.2 Medição da viscosidade

É utilizada uma geometria rotativa composta por dos cilindros concêntricos de dupla folga, ("*Double Gap Cylinder Sensor System according to DIN 53544"*, Figura 2.3) para medir a viscosidade das soluções assim como para fazer os testes preliminares de redução de arrasto. A mesma que foi utilizada por Bizotto e Sabadini (2008), Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014). Esta geometria é preferida para líquidos com baixas viscosidades a elevadas taxas de deformação, pois devido a sua grande área de contato é possível obter resultados com bastante exatidão, em uma ampla faixa de número de Reynolds.

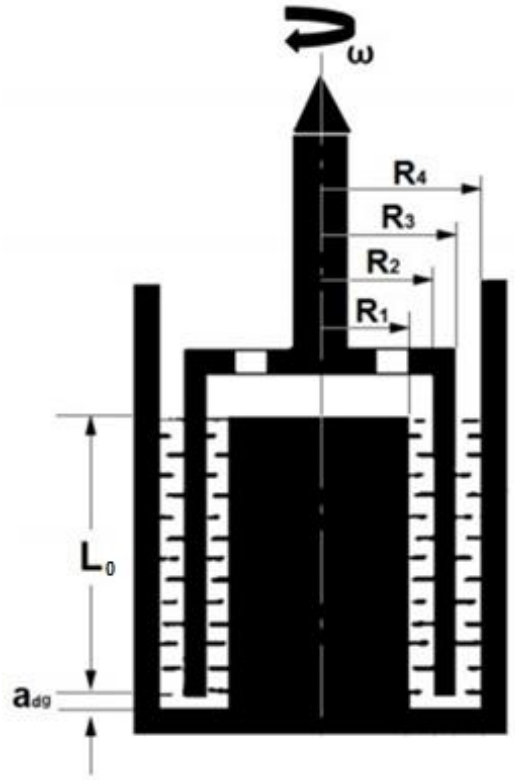


Figura 2.3 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução e fazer testes preliminares de DR.

Uma pequena amostra da solução polimérica, tomada do reservatório da bancada, é analisada através da geometria mencionada. A amostra é depositada entre duas superfícies axissimétricas formadas pelo copo que é fixo e o rotor que gira em torno do eixo com uma pré-indicada velocidade angular, o que faz gerar uma tensão de cisalhamento. O torque requerido para lograr e manter essa desejada tensão de cisalhamento é o parâmetro proporcional de viscosidade. As dimensões principais mostradas na figura são: $R_1 = 17{,}75$ mm, $R_2 = 18$ mm, $R_3 = 21{,}4$ mm, $R_4 = 21{,}7$ mm o comprimento do rotor $L_0 = 55$ mm e a distancia $a_{dg} = 5{,}1$ mm. O volume total de amostra no interior do copo é de 6,0 ml. A taxa de deformação média, $\dot{\gamma}$, é função da velocidade angular do rotor, ω, e do fator geométrico, k $\left(k = \frac{2{R_4}^2}{{R_4}^2 - {R_3}^2} = \frac{2{R_2}^2}{{R_2}^2 - {R_1}^2}\right)$ conforme equação abaixo.

$$\dot{\gamma} = k\omega = k\frac{2\pi}{60}n. \qquad (7)$$

Onde "n" é a rotação do rotor em rpm. O torque medido do rotor é relacionado à tensão de cisalhamento nominal, τ, segundo a Equação 8:

$$T_{dg} = \frac{4\pi L(\delta^2 {R_3}^2 + {R_2}^2)\tau}{1+\delta^2}. \quad (8)$$

Onde $\delta = {R_4}/{R_3} = {R_2}/{R_1}$ é a razão entre raios. A viscosidade é então obtida, conforme sua definição:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (9)$$

O teste no reômetro é feito incrementando-se a velocidade angular de 0 até 3000 rpm ao longo de 600 segundos, onde são aquisitados linearmente 900 pontos. A taxa de cisalhamento, viscosidade, taxa de deformação e outras propriedades do fluido são apresentadas como resultados de saída pelo reômetro. Destes dados, a viscosidade é a principal medida de interesse, pois é uma propriedade que é utilizada para calcular os resultados da redução de arrasto. Os valores da viscosidade são medidos em uma faixa de rotação do rotor $(1 < \omega < 420\ e\ 1 < Re < 350)$, na qual o escoamento está em regime laminar, pois a partir deste valor começam as primeiras instabilidades. Na Tabela 2.1 são apresentados todos os valores determinados para a viscosidade, que posteriormente são utilizados para calcular o número de Reynolds. A temperatura controlada é de 25 ºC para todas as medições, e o solvente utilizado é água filtrada. Esta mesma geometria é utilizada para a realização de testes preliminares de redução de arrasto na qual foi possível analisar a qualidade da água, e os tempos necessários para diluir os respetivos polímeros.

Tabela 2.1 – (A) Viscosidades das diferentes soluções poliméricas. (B) Viscosidades das soluções misturadas.

A

Polímero	$M_v\ (g/mol)$	$c(ppm)$	$\eta(mPa\,s)$
PEO	$4{,}0x10^6$	25	0.862
		50	0.914
		75	0.921
		100	0.973
		200	1.040
PEO	$5{,}0x10^6$	25	0.926
		50	0.951
		75	0.967
PAM	$5{,}0x10^6$	25	0.877
		50	0.904
		75	0.936
		100	0.945
		200	0.998
XG	$2{,}0x10^6$	25	0.922
		50	0.986
		75	1.029
		100	1.077
		200	1.500
Água pura filtrada			0.852

B

Mistura de polímeros	
Concentração de Polímeros (ppm)	$\eta(mPa\,s)$
PEO 25 + XG 75	0.992
PEO 50 + XG 50	1.060
PEO 75 e XG 25	1.128
PEO 100 + XG 100	1.346
PAM 75 e XG 25	0.972
PAM 100 e XG 100	1.240

As massas moleculares na mistura de polímeros são: $(4x10^6, 5x10^6\ e\ 2x10^6)$ g/mol, para o PEO, PAM e XG respetivamente.

Nota-se que a viscosidade aumenta com a concentração e com a massa molecular. Para a mesma massa molecular, o PAM apresenta menos incremento na viscosidade do que para PEO. Por outro lado a XG, polímero rígido com uma massa molecular menor, aumenta consideravelmente a viscosidade. A viscosidade para os polímeros flexíveis (na faixa analisada nesta pesquisa) apresenta um comportamento levemente pseudoplástico em comparação com a solução de XG.

2.3 Preparo e caracterização das soluções

Analisam-se dois polímeros plásticos flexíveis (PEO e PAM) e um polímero plástico rígido (XG). Todos fornecidos pela Sigma-Aldrich. Para o PEO são utilizadas duas massas moleculares: $M_{v1} = 4 \times 10^6$ g/mol e $M_{v2} = 5 \times 10^6$ g/mol, para o PAM e XG

uma massa molecular média de $M_{v3} = 5 \times 10^6$ g/mol e $M_{v4} = 2 \times 10^6$ g/mol, respetivamente. A justificativa para o estudo de PEO, PAM e XG é fundamentada principalmente por sua significativa redução de arrasto como é mostrado por outros autores, como: Virk, Mickley e Smith(1967), Choi *et al.* (2000), Kalashnikov (1998), Vanapalli, Islam e Solomon (2005) e Pereira, Andrade e Soares (2013). A massa molecular dos polímeros foi avaliada calculando-se a viscosidade intrínseca, $[\eta]$, por Pereira e Soares (2012). Os resultados foram bem consistentes como os indicados pela *Sigma-Aldrich*. A medida da viscosidade intrínseca foi usada para estimar as concentrações de "Overlap" do PEO e PAM pela relação $c^*[\eta] = 1$. (c^* é a concentração abaixo da qual se considera solução diluída). Para cada uma das massas moleculares, sendo: $c_1^* = 3900$ ppm, $c_2^* = 3125$ ppm e $c_3^* = 100$ ppm. Para o XG o procedimento varia, pois este polímero apresenta um comportamento pseudoplástico mais acentuado. Então, a concentração de "overlap" deste polímero é estimada medindo-se a viscosidade à taxa de cisalhamento zero, η_0, em diferentes concentrações. c^* é determinado quando η_0 tem uma significativa variação. Obtendo-se $c_4^* = 940$ ppm. As concentrações utilizadas nesta pesquisa estão na faixa de $25 < c < 200$ ppm, ou seja são empregadas soluções diluídas com exceção do PAM para $c = 200$ ppm.

Para preparar as amostras, são analisadas as seguintes quatro questões: o tipo da água a utilizar (da torneira, filtrada e deionizada), o método de mistura (direto ou indireto), tempo de mistura da amostra (no qual a solução fica totalmente dissolvida) e condições em que a amostra fica durante o tempo de diluição.

2.3.1 Análises da água

Água de torneira, filtrada e deionizada é misturada com uma concentração de $\mathrm{c} = 100$ ppm de óxido de polietileno, $\mathrm{M_v} = 5\mathrm{x}10^6$ g/mol, com o objetivo de avaliar qual tipo de água apresenta o melhor comportamento, isto para posteriormente realizar os testes de redução de arrasto na bancada. É realizado um teste de viscosidade versus rotação no reômetro, onde a solução é submetida a uma rotação continua de 0 a 3000 rpm, como pode ser observado na Figura 2.4.

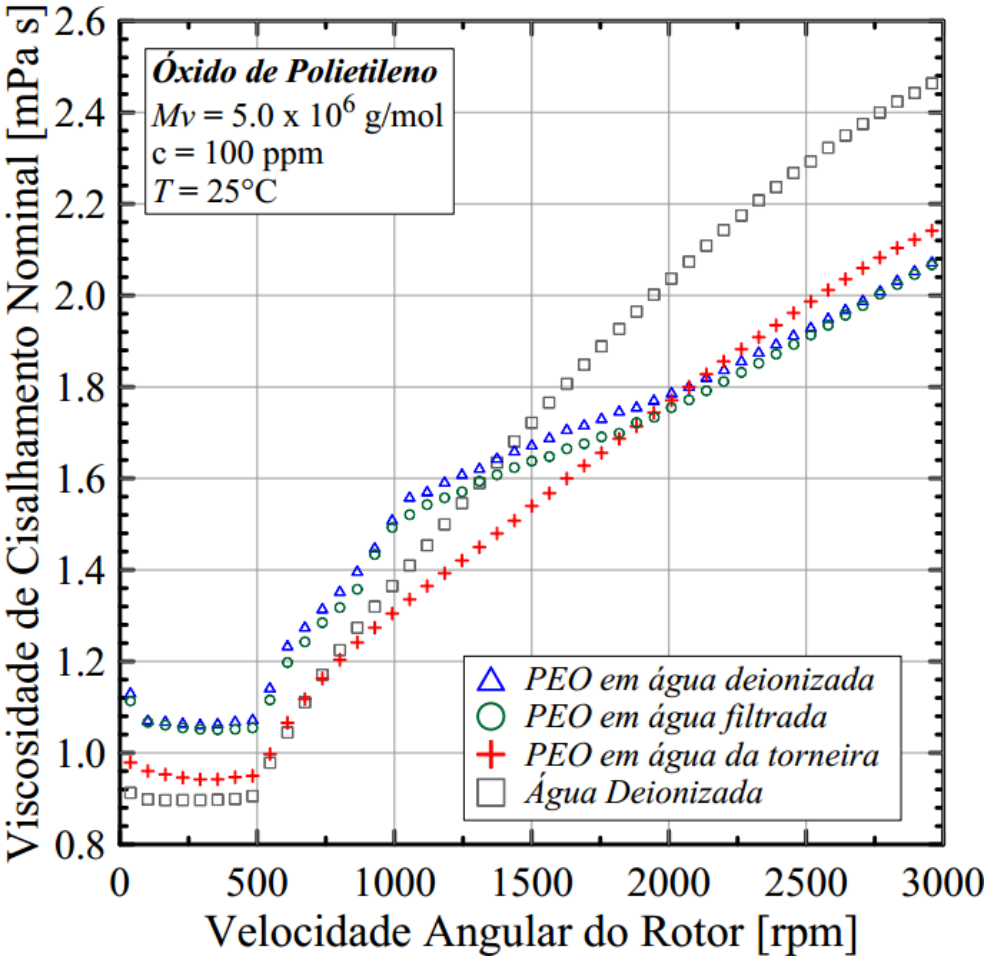


Figura 2.4 – Teste feito no reômetro para determinar o tipo da água a utilizar.

A viscosidade para água filtrada e para a deionizada aumentam, como é observado no regime laminar (de 0 a 500 rpm aproximadamente) e a redução de arrasto se torna muito similar ao longo da região de instabilidade, ou seja, o polímero apresenta comportamentos semelhantes nos dois métodos de purificação da água. Por outro lado, a água da torneira não apresenta variação na viscosidade com adição do polímero e a redução de arrasto diminui. Isto ocorre provavelmente devido aos sais ou alguma impureza que contém a água. Decide-se então, realizar os testes com água filtrada por sua maior facilidade de preparação e consumo de tempo. Outra razão de não se utilizar água deionizada nesta pesquisa é devida as instabilidades apresentadas no medidor de vazão magnético. O princípio de medição da vazão usado por medidores magnéticos depende de uma boa condutividade elétrica. A filtragem da água é feita através de três filtros, em ordem: (plissado $(30\ \mu m)$, polipropileno $(10\ \mu m)$ e carvão $(5\ \mu m)$). Isto para diminuir a turbidez, óxidos, sais e outras impurezas.

2.3.2 Método de mistura

É analisado um método de mistura indireta, que consiste em depositar o polímero em uma garrafa plástica de três litros que contém água filtrada, onde posteriormente é deixada durante três dias para fazer uma mistura por difusão. Este tempo é suficiente para notar uma mistura homogênea. Depois, é feito um processo de diluição com essa mesma solução de três litros com outra quantidade de água (47 L), e deixada outros dois dias em estoque para garantir uma total dissolução. A temperatura durante todo processo de mistura é de 25 ºC (temperatura de execução do teste). Outro método é depositando diretamente o polímero (em pó) sobre o recipiente que contém 50 L de água e posteriormente deixando-o durante quatro dias, tempo ótimo de mistura, como é observado nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7. O resultado para analisar o melhor dos métodos de mistura é através de testes de redução de arrasto na bancada. Assim, feitos os testes, observa-se que os dois métodos atingem a mesma redução de arrasto, mas o método de diluição direta é melhor por que precisa de menos tempo (quatro dias) para sua diluição. Esse tempo foi testado e usado para os diferentes polímeros, massas moleculares e concentrações, nesta pesquisa.

2.3.3 Tempo total de mistura

Depois de selecionada a água filtrada como solvente são realizados vários testes no reômetro durante diferentes intervalos de tempo, ($24, 48\ e\ 96$ h), para avaliar o ponto no qual as soluções ficam totalmente dissolvidas. Para o PEO é utilizado um tempo de 48 h de diluição com água deionizada, também usada por Pereira (2012). Compara-se a viscosidade aparente com os valores obtidos pelo autor, como mostrado na Figura 2.5.

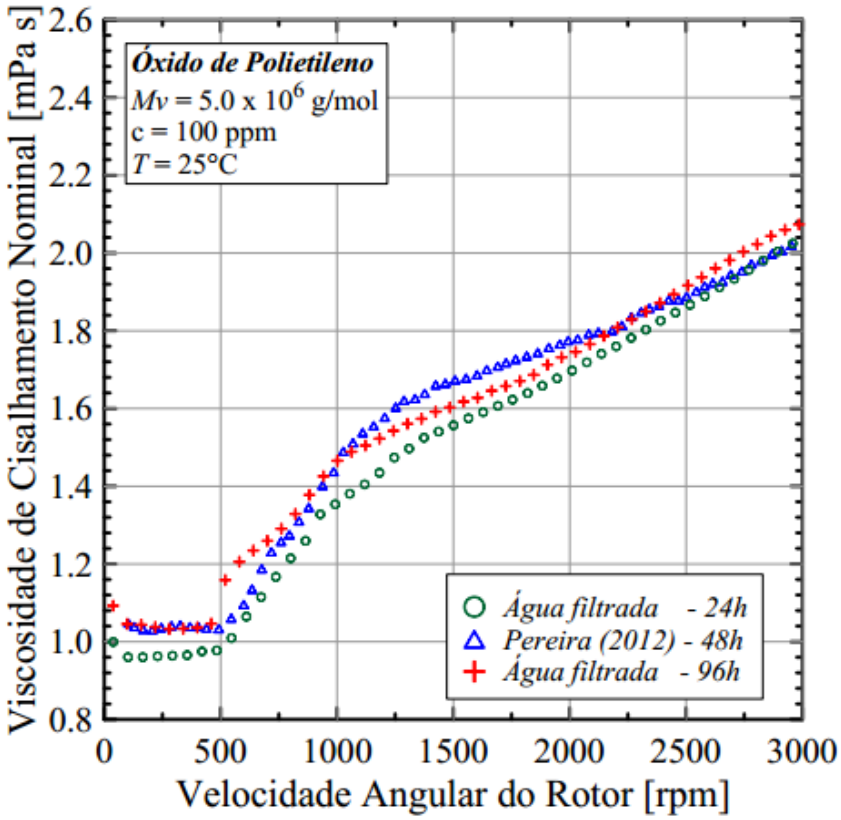


Figura 2.5 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de PEO.

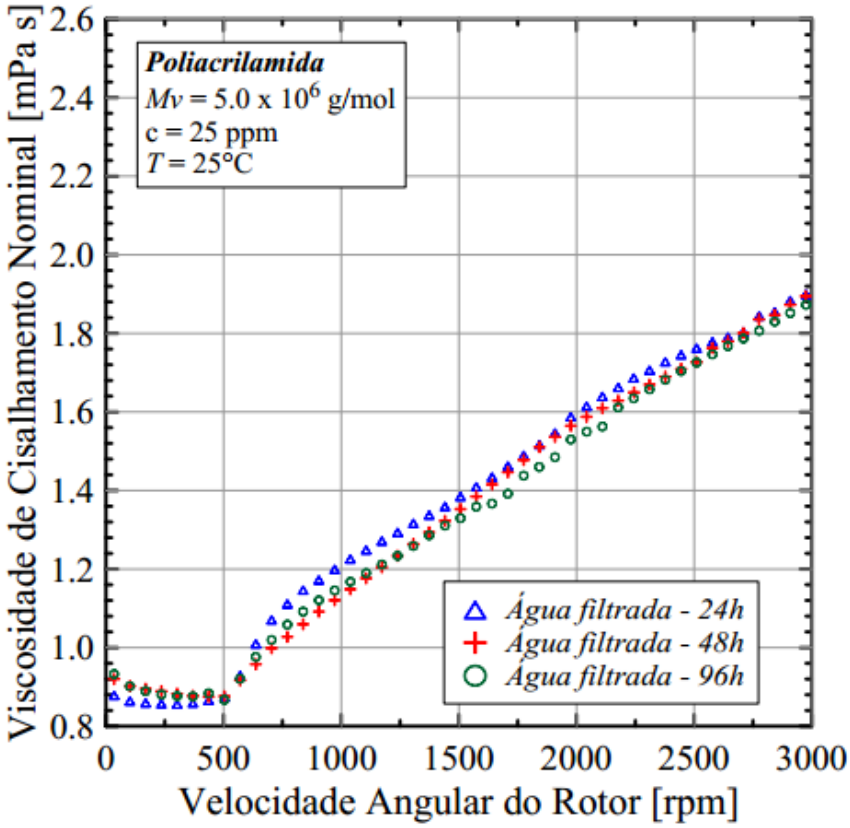


Figura 2.6 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de PAM.

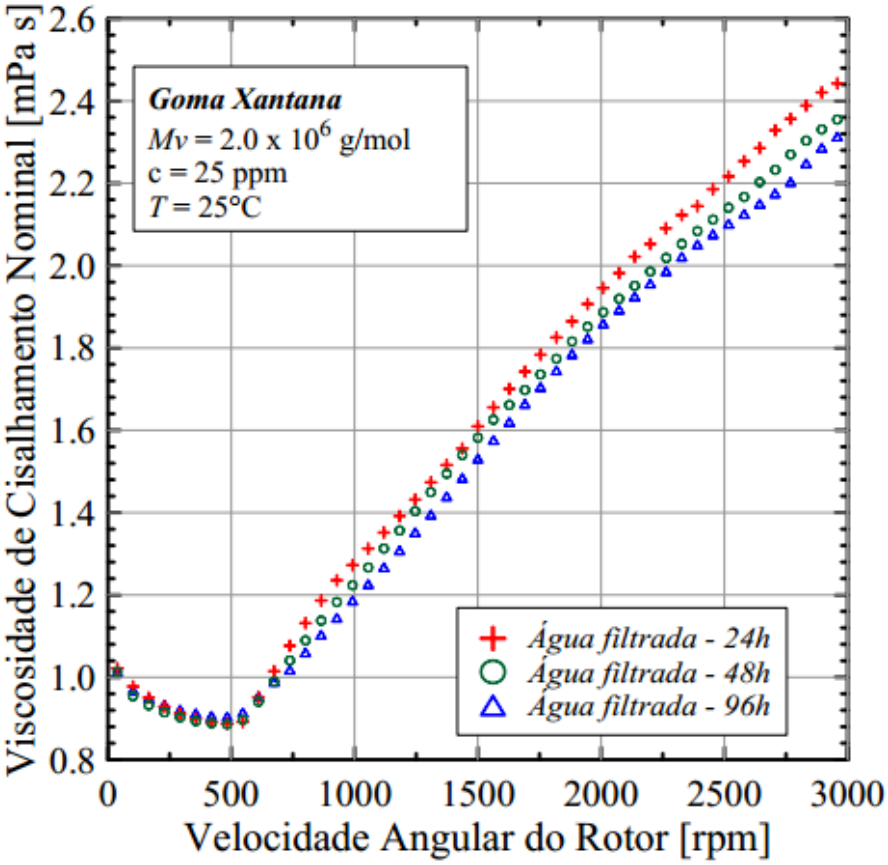


Figura 2.7 – Análises do tempo de diluição natural das soluções de XG.

Observa-se que a viscosidade de cisalhamento nominal da solução que é analisada para um tempo de 24 h é menor em relação às soluções de 48 e 96 h, (aproximadamente 15%), tempo no qual os valores variam minimamente em ambas as soluções, indicando que se encontram completamente diluídos no solvente. Os tempos de diluição das soluções de PAM e XG também são avaliados (ver Figuras 2.6 e 2.7). Para o PAM a viscosidade não tem variação significativa durante o período de medição, tanto na região laminar como na região turbulenta, indicando que o polímero se mistura com maior facilidade. Entretanto, verifica-se o comportamento afinante da XG em baixas taxas de deformação, mesmo para uma concentração pequena ($c = 25$ ppm). Apesar de que as mudanças de viscosidade são mínimas no regime laminar, na região de instabilidade apresenta uma leve variação a favor do maior tempo de diluição (96 h). Por maior confiabilidade, usa-se um tempo de 96 h como o adequado para a total mistura da amostra por diluição.

2.3.4 Condições de estoque da amostra

Um fator importante, que altera o resultado dos testes são as condições nas quais a solução permanece durante o tempo de diluição. Entre essas condições destaca-se a temperatura, pois acredita-se que neste tempo de mistura o aumento significativo da temperatura além de acelerar a degradação biológica do polímero, altera o raio de giração da molécula, dificultando repetitividade nos resultados de DR. Assim, os testes na bancada experimental são programados para se realizar de manhã onde a temperatura média é de 25 ºC. Também, durante o tempo de diluição as soluções são depositadas em uma sala escura, com temperatura controlada de 25 ºC.

Depois das análises anteriores é decidido preparar as amostras fazendo uma mistura direta da concentração e do polímero desejado com a água filtrada, que se encontra em estoque em recipientes lacrados de 50 L. A solução é deixada em uma sala protegida da luz solar durante quatro dias para que fique totalmente dissolvida. As condições de temperatura são controladas a 25 ºC, a mesma da execução do teste.

2.4 Preparação das amostras

As amostras são preparadas cuidadosamente evitando alguma contaminação do polímero e da solução com o ambiente. A água filtrada é tomada no mesmo dia e da mesma fonte, onde é depositada em recipientes de 50 L que têm sido previamente limpos com sabão e acetona. Com essa quantidade de água 150 L são preparados os testes para uma concentração específica de 25, 50, 75, 100 e 200 ppm para um determinado polímero. Não é empregado nenhum dispositivo para misturar as soluções, pois podem causar degradação no polímero. Ao finalizar e antes de começar cada experimento é passado água pelas tubulações do aparato experimental à pressão de 400 KPa, para retirar possível polímero grudado na parede da tubulação.

2.5 Critério estatístico para rejeição dos dados atípicos

Enquanto o fluido passa pela tubulação do aparato experimental, os dados capturados pelos instrumentos de medição são aquisitados pelo programa LabView. O tempo necessário para a solução passar do vaso de pressão até o reservatório é de aproximadamente dois minutos e o número de dados aquisitados pelo programa são 120, ou seja, um dado por segundo. Este número de amostra é suficiente para a análise. Entre esse conjunto de dados é tomado um valor representativo para a pressão e a vazão. Entre os dados há um conjunto discrepante, conhecidos como dados atípicos. As variações desses dados ocorrem provavelmente pelas perturbações no processo ou também por alguma pequena variação na pressão, que é tratada de ser mantida constante, no vaso de pressão. Para determinar quais destes valores fogem à tendência dominante, faz-se necessário utilizar um critério para sua eliminação. Neste projeto é utilizado o critério estatístico de CHAUVENET. O principio do critério é encontrar uma banda de probabilidade que está centrada na média de uma distribuição normal, que deve conter todas as amostras de um conjunto de dados. Todos os dados que fiquem fora desta banda de probabilidade serão rejeitados, removidos da amostra e uma nova média e desvio padrão baseados nos remanescentes valores pode ser calculada.

A distribuição normal ou Gaussiana fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado de certo valor da média esperada. Não se pode esperar probabilidade menor que 1/S, onde S é o número de amostras. O critério de Chauvenet é ainda mais restritivo e específica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade $\boldsymbol{p}$ de obter o desvio em relação à média é menor que 1/2S. A Tabela 2.2 lista valores da razão do desvio em relação ao desvio padrão para vários valores de S conforme este critério.

Tabela 2.2 – Critério de expurga de Chauvenet.

Número de leituras (S)	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão $d_{máx}/\sigma$
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 aplicar o critério de Chauvenet primeiro é calculado o desvio médio e desvio padrão dos dados medidos. Para analisar quanto os dados diferem da medida, então o desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela 2.2, para assim se eliminar os pontos duvidosos. Em nosso caso, como são aquisitados aproximadamente 100 dados, então, a razão de $\mathbf{d_{máx}/\sigma = 2,81}$. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados. No apêndice A se apresenta um exemplo de tomada da vazão da água. Todos os valores de pressão e vazão nesta pesquisa são analisados através deste método.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS

Este capítulo está constituído de várias seções, a primeira é a validação do aparato experimental. Seguidamente se apresentam os valores obtidos da redução de arrasto absoluta em função do número de passes. São avaliados os efeitos da concentração e de massa molecular (para o PEO). Também nesta mesma seção é mostrado um resultado interessante para o polímero rígido na qual a solução é impulsionada por meio de uma bomba centrífuga de um estágio. Posteriormente são quantificadas e expostas as influências da redução de arraste no fator de atrito, o ganho de vazão e diminuição da queda de pressão na tubulação. Para analisar a degradação das soluções, os valores de DR são retomados e apresentados em função da redução de arrasto relativa DR'. Consecutivamente uma função de decaimento para o ajuste dos dados de DR' é apresentada seguindo a mesma base da equação proposta por Pereira e Soares (2012) para um dispositivo cilíndrico rotatório. Por fim, na última seção é exposta uma serie de experimentos com mistura de polímeros que permite determinar e comparar se é mais conveniente utilizar uma mistura ou uma simples concentração de polímero.

3.1 Resultados preliminares

Depois de analisar o procedimento para preparação dos testes no capítulo anterior, o seguinte passo é realizar um experimento para avaliar a efetividade da bancada e desta forma ganhar confiabilidade na realização dos experimentos.

Como é descrito na secção 2.2, há um trecho da bancada que é composto de aço inoxidável com brunimento, onde são medidas as pressões do escoamento turbulento. Essas caraterísticas fazem com que o escoamento tenha comportamento como em um tubo liso, ou seja, a rugosidade fica coberta pela subcamada laminar e não influencia no fator de atrito.

O experimento de avaliação da bancada é feito passando 150 L de água filtrada pelas tubulações repetidas vezes, variando o número de Reynolds durante cada número de passe, desde: 50000 até 120000, faixa a qual são feitos os experimentos com as soluções poliméricas. Os testes são feitos mantendo a pressão constante no vaso de pressão durante cada número de passe. Com a diferença de pressão medida na seção de teste, $\frac{\partial p}{\partial x}$, com o diâmetro constante, onde o escoamento é totalmente desenvolvido, a temperatura de $(25\ ºC \pm 2\ ºC)$, o fator de atrito do aparato experimental é calculado através da definição de Darcy, utilizando a Eq. (5).

Depois de fazer o experimento, uma faixa de valores do fator de atrito experimental é obtido, como se mostra na Figura 3.1 (círculos azuis). Com estes dados é obtida uma expressão que descreve o fator de atrito experimental da bancada em função do número de Reynolds, que posteriormente é utilizada para calcular o fator de atrito das diferentes soluções. Adicionalmente, cada dado medido é comparado com a correlação do fator de atrito de Blasius para tubulações lisas, (válida para escoamentos totalmente desenvolvidos na faixa $2320 < Re < 100000$). Usa-se a seguinte correlação: $f = 0.316 * Re^{-0.25}$

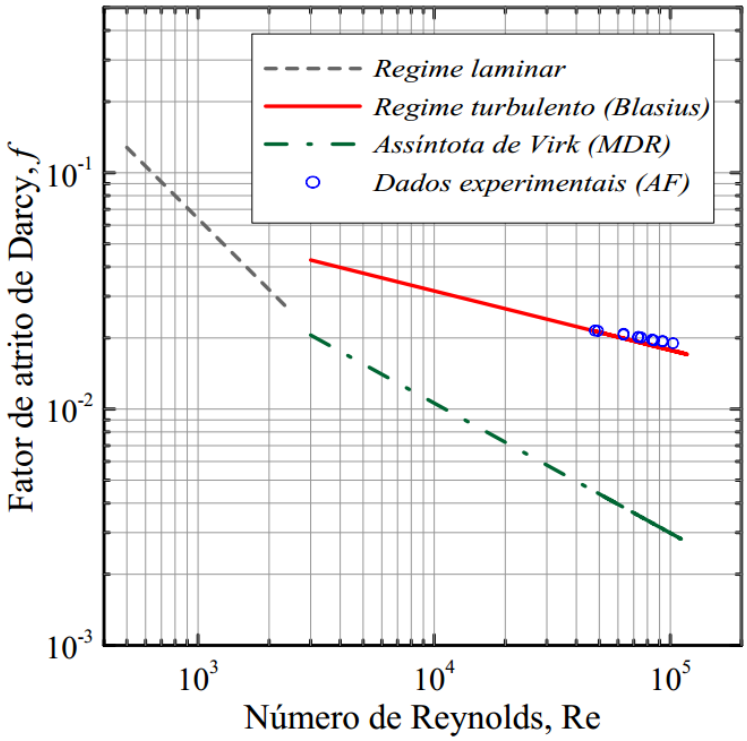


Figura 3.1 – Validação da bancada experimental para água filtrada.

Fazendo a mencionada comparação tem-se que a máxima diferença entre o fator de atrito de Blasius e o fator de atrito dos dados experimentais da bancada é de 6%. Na Figura 3.1 se pode observar que os dados experimentais ficam próximos à correlação turbulenta de Blasius e há maior diferença quando se aumenta o número de Reynolds.

Para obter ainda maior certeza nos experimentos, são feitos dois testes com soluções separadas do mesmo aditivo. Então, uma solução de PAM com massa molecular de $M_v = 5 \times 10^6$ g/mol com uma concentração de 50 ppm é impulsionada pelo compressor a uma pressão constante de 250 KPa. Os resultados são mostrados na Figura 3.2. Os testes são feitos em dias diferentes do mesmo mês, a temperatura média é 25 ºC.

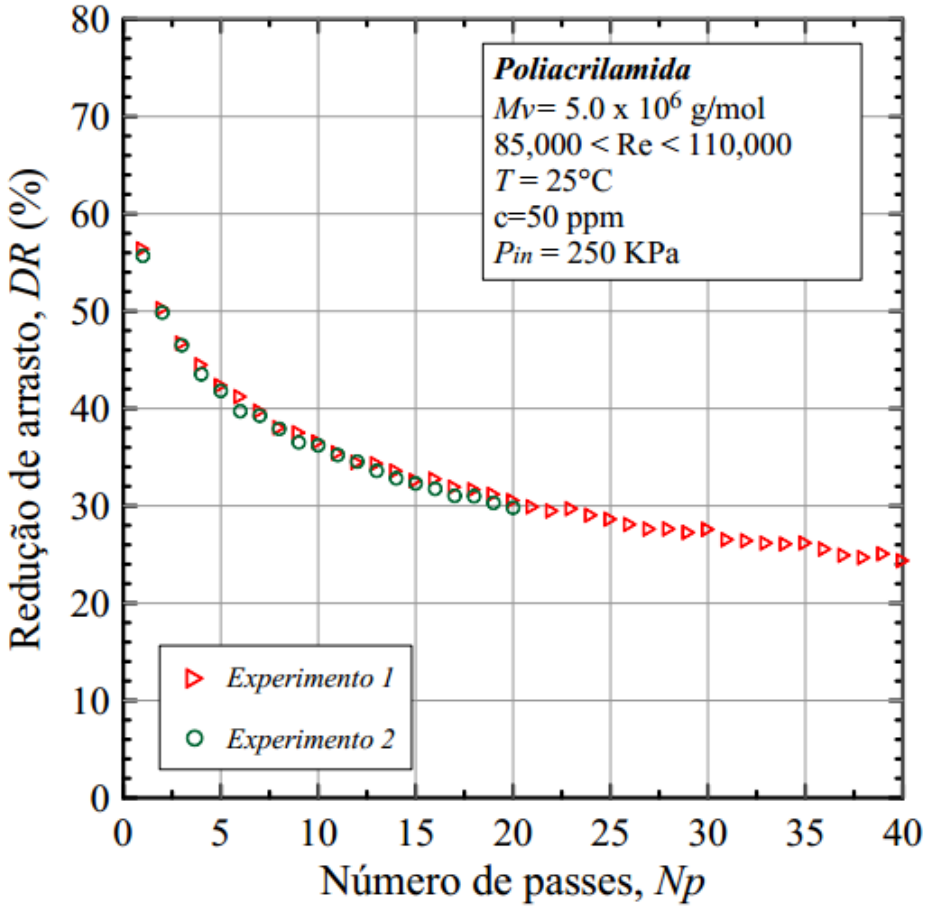


Figura 3.2 – Resultado de repetitividade para avaliar a precisão dos experimentos.

Nota-se que os resultados são muito próximos para os dois experimentos, pois a máxima diferença de redução de arraste entre os dois pontos mais distantes, medidos no mesmo número de passe é de 1,2%.

Finalmente na Figura 3.3 mostra-se os resultados dos testes realizados no reômetro para cada concentração estudada de PEO $M_v = 4 \times 10^6$ g/mol. Isso com o objetivo de analisar a similaridade qualitativa dos resultados conseguidos no reômetro com os obtidos na bancada de redução de arrasto. A amostra é tomada da solução polimérica do reservatório da bancada no dia em que é feito o experimento, e o teste no reômetro é feito nesse mesmo dia para evitar qualquer degradação biológica da solução.

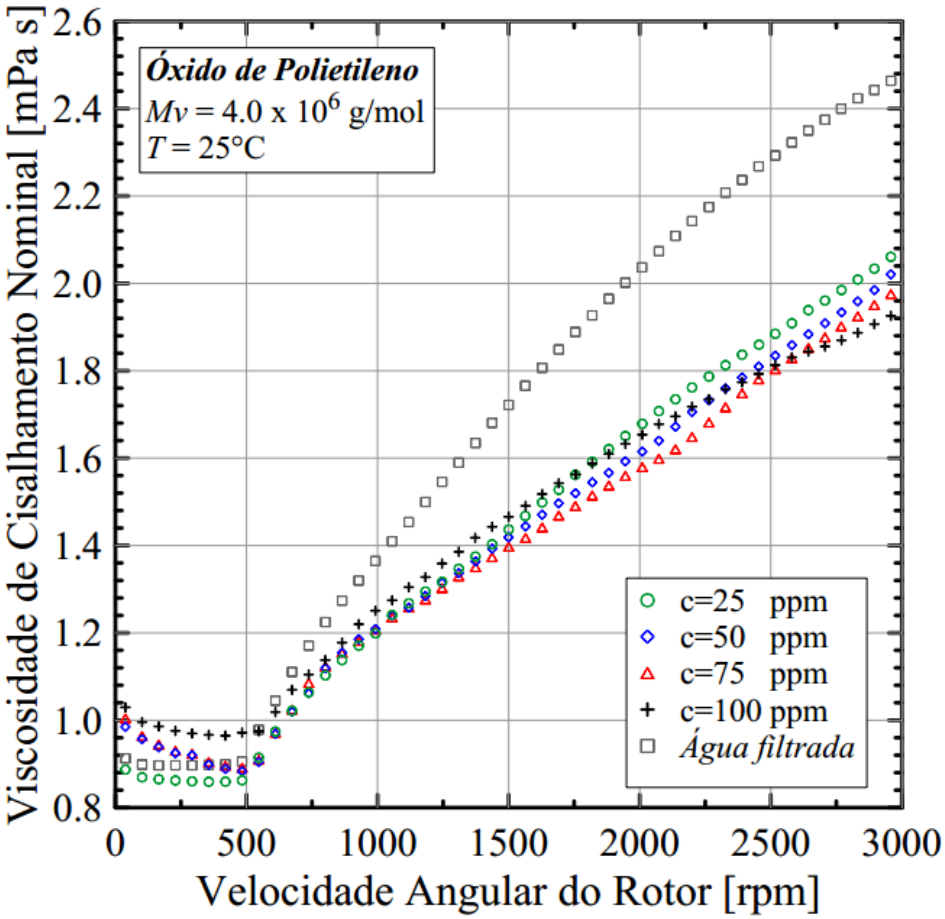


Figura 3.3 – Análises de DR no reômetro para as diferentes concentrações de PEO.

Como esperado a viscosidade e o DR (observada na seção turbulenta) aumentam com o incremento da concentração. Resultado que concorda qualitativamente com os obtidos na bancada experimental (veja Figura 3.4) e também coerentes com os mostrados pelos autores: Pereira e Soares (2012) e Bizotto e Sabadini (2008). Nota-se a grande diferença de DR que existe no final do teste entre uma solução aditivada e a água, por exemplo, 20% maior para uma solução de 75 ppm.

3.2 Influências da concentração e da massa molecular do polímero no fenômeno da redução de arraste absoluta.

O teste para analisar o efeito da concentração é realizado inicialmente para PEO, com duas massas moleculares $4x10^6$ g/mol e $5x10^6$ g/mol. A solução é impulsionada por um compressor com pressão constante de 250 KPa. O teste é feito na temperatura de $(25 \pm 2)\,ºC$. Concentrações de 25, 50, 75, 100 e 200 ppm são utilizadas, (todas concentrações diluídas). O efeito de DR negativo que ocorre nos primeiros instantes que sucedem a injeção do polímero no escoamento turbulento não é possível evidenciar-se devido à configuração da bancada experimental. Dimitropoulos *et al.* (2006) indica que esse efeito está associado à remoção de energia do escoamento médio para esticar as macromoléculas. Obviamente isto ocorre para polímeros flexíveis. Esses efeitos são analisados com bastante detalhe em dispositivos rotatórios, pois têm grande precisão e é possível capturar o comportamento do fenômeno em sua totalidade. Para mais detalhes veja Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014). Os resultados obtidos neste trabalho partem do ponto de máxima redução de arraste, $DR_{máx}$, e logo depois começa a degradação da cadeia molecular do polímero, à medida que a solução escoa pela tubulação, como mostrado na Figura 3.4.

É importante destacar que o efeito que ocorre durante o tempo de resistência, t_r, no qual o polímero se mantem um breve tempo na máxima redução de arraste, não é evidenciado aqui, pois devido à intensificação da turbulência, o polímero, além de atingir a máxima redução de arraste no primeiro passe, também inicia sua degradação na cadeia molecular. Então, no segundo passe o que se observa é uma diminuição do DR, indo na direção da redução de arraste assintótica, DR_{asy}. Como é mostrado na Figura 3.4, os polímeros apresentam comportamentos similares para as duas massas moleculares estudadas, pois são bastante próximas, e na medida que a concentração aumenta, os valores de DR tendem a ser iguais para as duas massas moleculares. Como tem sido observado por outros autores, a redução de arrasto aumenta com o incremento da concentração e massa molecular (veja, Den Toonder *et al.* (1995) e Vanapalli, Islam e Solomon (2005)), e nos primeiros passes o aumento de DR entre concentrações é menor.

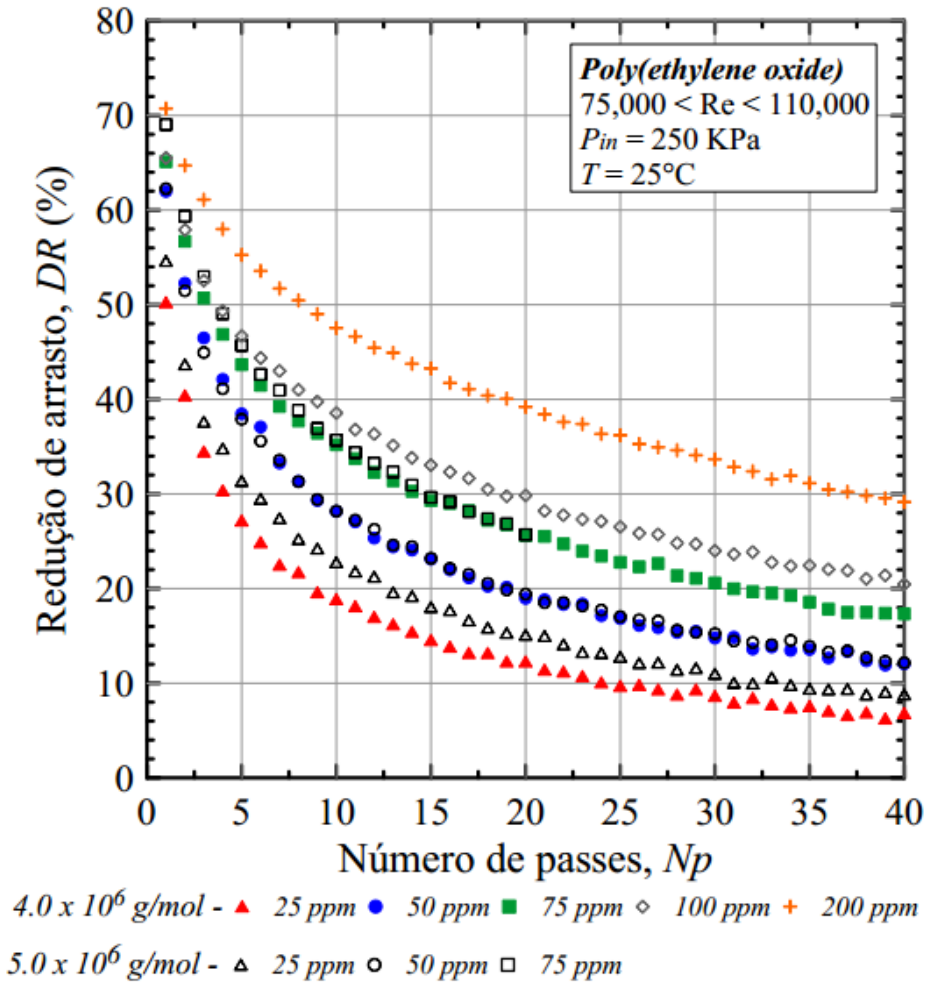


Figura 3.4 – Variação de DR com o Np. Efeito da concentração para uma solução de PEO.

Isso porque se está próximo da máxima redução de arraste (MDR) ou assíntota de Virk, que neste caso, está compreendida na faixa de 80% até 85%. Outra região de interesse é a parte na qual as soluções alcançam o DR assintótico, (nos últimos passes), onde o DR diminui cada vez menos à medida que avança o experimento. Como esperado, a eficiência de DR é uma função crescente da concentração. A solução de 25 ppm de PEO com $M_v = 4 \times 10^6$ g/mol atinge um valor assintótico de 6% de redução de arrasto. Esse valor incrementa para 12% com 50 ppm e para 20% a 100 ppm, e, finalmente, para 30% a 200 ppm, indicando que o ganho em eficiência cai quando c está incrementando. O que é de prever, pois o DR é delimitado pela MDR. Finalmente, apesar de que a cadeia polimérica degrada até DR_{asy}, continua reduzindo arrasto porque quando ocorre os rompimentos intermoleculares, esta se subdivide em menores estruturas que têm tamanho suficiente para interagir com os vórtices do escoamento turbulento.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão em grande concordância com os reportados por Vanapalli, Islam e Solomon (2005), que também realizaram os experimentos com uma solução de PEO com $M_v = 5 \times 10^6$ g/mol e concentração de 100 ppm. Os autores analisaram a perda de eficiência de DR com o aumento dos números de passes. A bancada experimental mostrada nesta pesquisa é bastante similar à usada pelos referidos autores. O resultado de DR obtido pelos autores para o primeiro passe é de 75%, semelhante com o que é reportado na Figura 3.4, de aproximadamente 70%. Depois da solução ter percorrido 36 m (que corresponde a 12 passes na bancada dos autores), o valor de DR é próximo a 45%, resultado também similar ao obtido aqui que é de 50% aproximadamente, indicando a grande semelhança dos resultados para a mesma solução.

Experimentos para PAM e XG foram feitos com massas moleculares de $M_v = 5 \times 10^6$ g/mol e $M_v = 2 \times 10^6$ g/mol, respetivamente. A pressão é mantida constante durante os testes a 250 KPa e a temperatura média dos testes é de (25 ± 2) ºC. Os resultados são qualitativamente semelhantes com os que foram obtidos para o PEO, ou seja, com o incremento da concentração também aumenta o DR, (ver Figuras 3.5 e 3.6). Quando há maior quantidade de polímeros, estes suprimem maior quantidade de vórtices turbulentos e, portanto, reduzem ainda mais o fator de atrito da solução, o que resulta no aumento de DR.

É importante ressaltar que a concentração de 200 ppm de PAM é uma solução concentrada, (cruzes da Figura 3.5). Mas mesmo com esta condição, nota-se que ainda a solução não está saturada, já que os valores obtidos para DR estão longe da MDR, que estão compreendidos entre 80% até 85%.

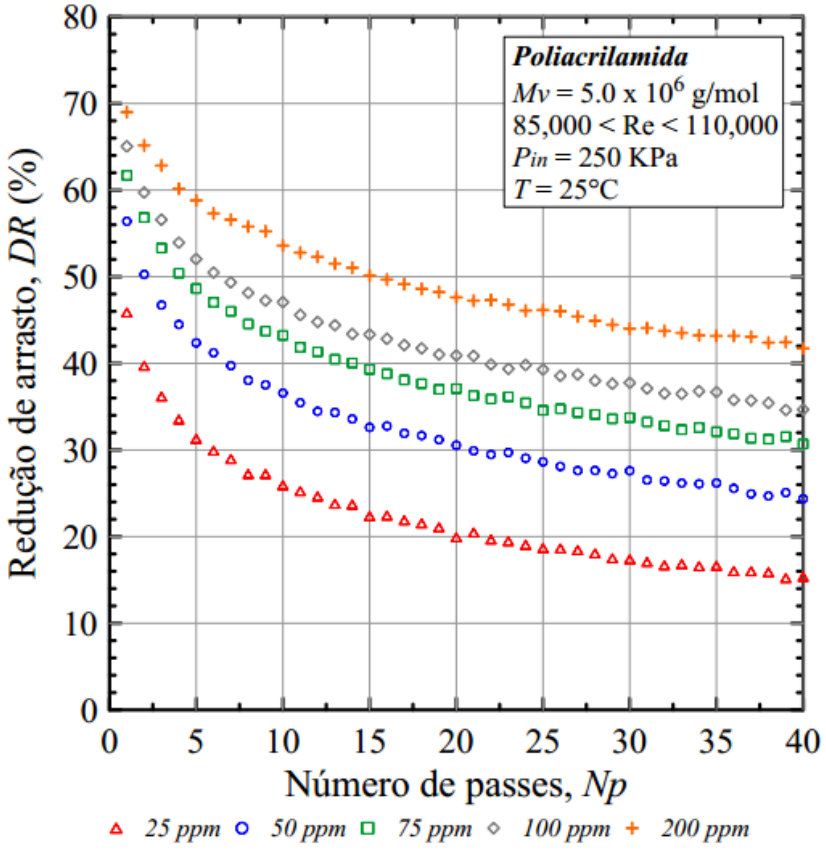


Figura 3.5 – Variação de DR com Np. Efeito da concentração para uma solução de PAM.

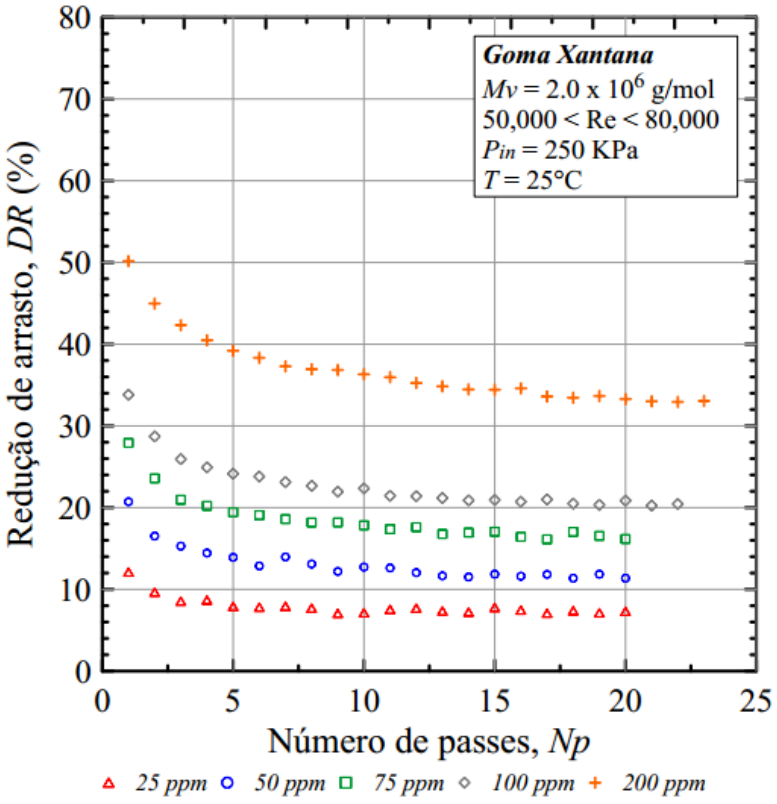


Figura 3.6 – Variação de DR com o Np. Efeito da concentração para uma solução de XG.

Para poder fazer uma melhor análise das soluções poliméricas em estudo, são contrapostos os resultados de DR obtidos com diferentes concentrações, como se mostra nas Figuras 3.7 e 3.8.

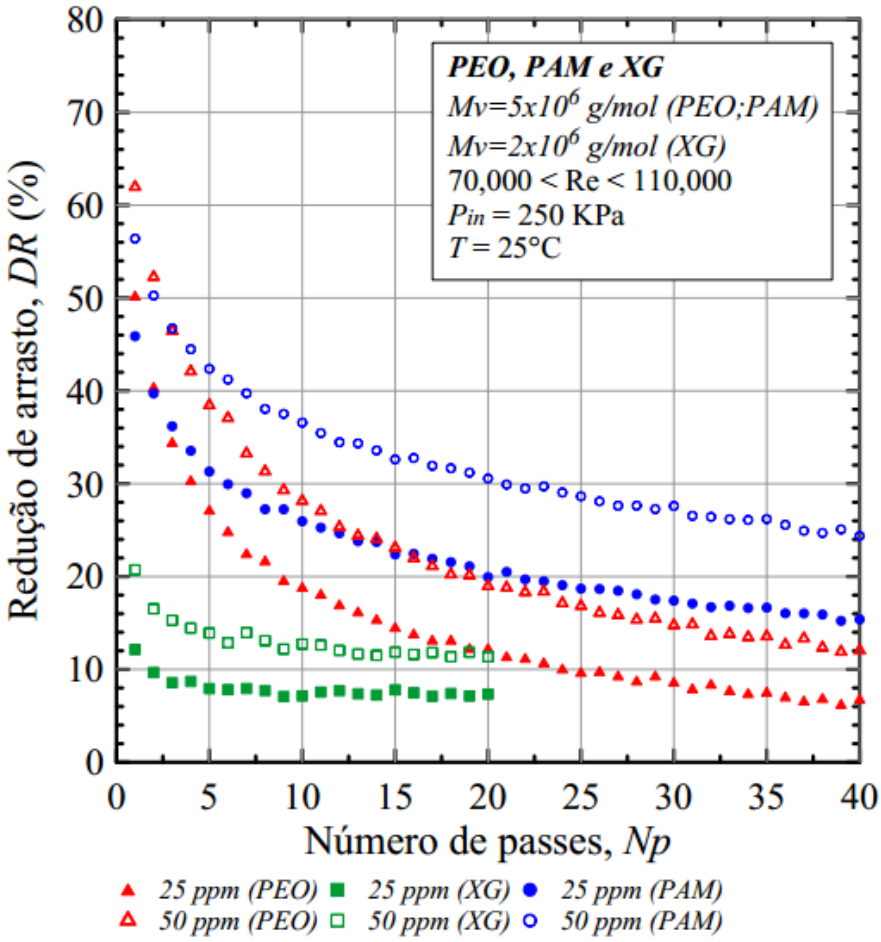


Figura 3.7 – Comparação de DR variando as concentrações de 25 ppm e 50 ppm, para soluções de PEO, PAM e XG.

Observa-se no inicio do teste que as soluções de PEO atingem as maiores reduções de arrasto quando é comparado entre concentrações. Por exemplo, para a concentração de 25 ppm de PEO, o DR é de 55%, enquanto para as soluções de PAM e XG são 45% e 12% respetivamente. Provavelmente, esse efeito esteja associado à elasticidade de cada polímero. Alguns pesquisadores correlacionam os níveis de redução de arraste alcançados com as propriedades elásticas de soluções concentradas (veja, Bewersdorff e Berman (1988) e Jaafar, Escudier e Poole (2009)). Pereira, Andrade e Soares (2013), fazem um experimento para avaliar o módulo de armazenamento, G', e o modulo de perda, G'', de soluções concentradas. Constata-se que a porção elástica é mais evidente para soluções de PEO (nas duas

massas moleculares, $M_v = 4x10^6$ g/mol e $M_v = 5x10^6$ g/mol) do que para soluções de PAM com $M_v = 5x10^6$ g/mol.

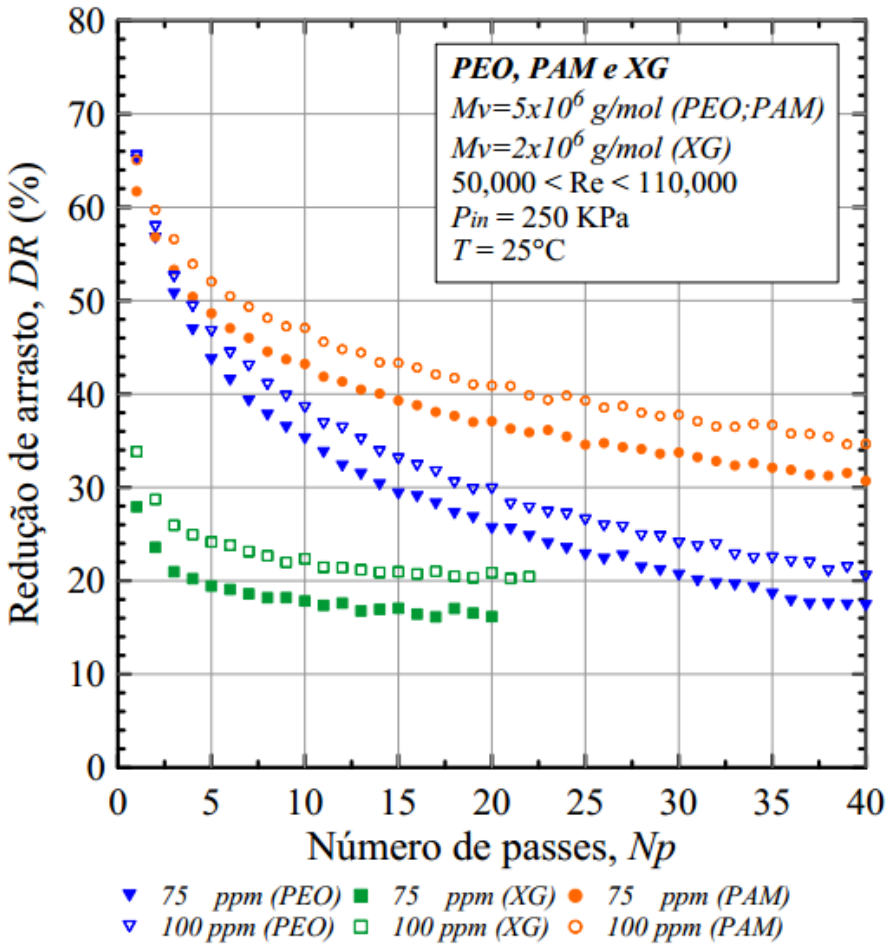


Figura 3.8 – Comparação de DR variando as concentrações de 75 ppm e 100 ppm, para soluções de PEO, PAM e XG.

Embora o PEO alcance as máximas reduções de arrasto, o PAM é o polímero que tem maior resistência à degradação (de fato, uma concentração de 75 ppm de PAM atinge o regime permanente em um maior valor de DR que o PEO com 100 ppm). Sugere-se que esse comportamento esteja associado principalmente às ligações químicas da estrutura polimérica do PAM, fazendo com que sua cadeia molecular seja mais resistente. Em uma investigação feita por Vanapalli, Ceccio e Solomon (2006) é estudado o mecanismo de degradação polimérica em soluções de PEO e PAM em nível microscópico. Eles reportam que as macromoléculas de PAM sofrem menos cisões devido a maior estabilidade de suas ligações moleculares.

Das Figuras 3.7 e 3.8 se observa que as soluções de XG apresentam os menores registros de DR quando é comparada com PEO ($M_v = 4 \times 10^6$ g/mol) e PAM ($M_v = 5 \times 10^6$ g/mol), mas é importante notar que este polímero tende a um valor constante ou assintótico rapidamente, aproximadamente no quarto passe atinge DR constante. Por exemplo, o máximo valor obtido no primeiro passe para uma concentração de 200 ppm de XG é de 50%, consideravelmente menor em comparação com uma solução de PEO, aproximadamente 70%, mas, o valor assintótico atingido pelos dois polímeros é praticamente o mesmo, em torno de 32%.

Como observado o comportamento de DR para as soluções de XG é diferente em comparação com os polímeros flexíveis. Pereira, Andrade e Soares (2013) que trabalharam com os mesmos aditivos utilizados nesta pesquisa, mas em um dispositivo cilíndrico rotatório argumentam que a cisão macromolecular não desempenha uma função importante na degradação do XG, e indicam que a perda de eficiência está associada à desagregação ao invés de degradação. Shetty e Solomon (2008) observaram através da técnica de espalhamento de luz a formação de agregados em soluções diluídas de PEO. Acredita-se que a estrutura molecular do polímero em formação de agregados aumenta o comprimento da cadeia molecular e, portanto, também incremente o DR. Acredita-se então que esse mesmo comportamento ocorre com as soluções de XG analisadas nesta pesquisa. (Defina-se a formação de agregado em uma solução diluída como uma estrutura composta de mais de uma cadeia molecular, mas, sem formar uma rede ou um gel).

Os resultados ilustrados na Figura 3.9 mostram a elevada resistência das soluções de XG. A redução de arrasto medida para o escoamento turbulento, que é impulsionado por compressor de ar é comparada passo a passo com o escoamento proporcionado por uma bomba centrífuga, ao mesmo número de Reynolds. A ideia de utilizar a bomba é impor uma forte degradação localizada e desta forma observar o comportamento dos polímeros. O experimento é limitado a uma concentração de 50 ppm.

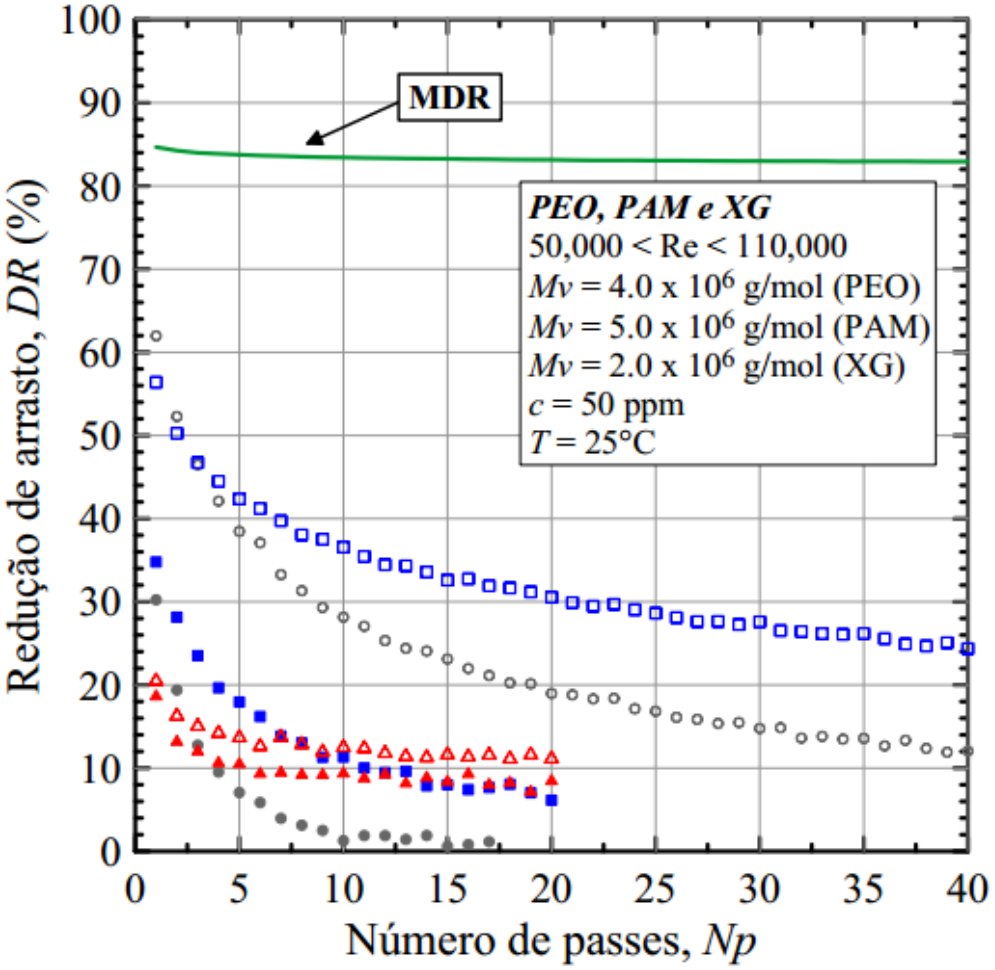


Figura 3.9 – Variação de DR para os diferentes polímeros quando é passado por uma bomba centrífuga.

A solução de PEO degradou depois de 10 passes pelas tubulações da bancada experimental (bola cheia cinza), enquanto a solução de PAM atingiu um valor assintótico de 9% (quadrado cheio azul), degradando consideravelmente se compararmos com a solução que foi deslocada pelo compressor, que para o mesmo número de passe foi de 35% aproximadamente. O mais importante de ressaltar neste experimento é o comportamento apresentado pela solução de XG. Observa-se que mesmo que a solução seja passada pelo rotor da bomba (onde se criam fortes tensões de cisalhamento), a cadeia molecular do polímero aparentemente não foi degradada. As curvas mostradas com compressor e com bomba mostram um comportamento bastante similar de DR, tanto no primeiro passe, $(DR \approx 20\%)$, quanto no estado estável próximo de 10%. Estes resultados levam a acreditar que a degradação não é o principal mecanismo que ocasiona a perda de eficiência em XG

e sustentam mais a ideia da desaglomeração, hipóteses que seria comprovada com um método de análises direta como espalhamento de luz dinâmica.

Finalmente, a Figura 3.10 ilustra o comportamento de DR quando é variada a massa molecular das soluções de PEO, ($M_v = 4 \times 10^6$ g/mol) e ($M_v = 5 \times 10^6$ g/mol). Os resultados apresentados são tomados da Figura 3.4 analisados para concentrações de 25 e 50 ppm. Obviamente o DR incrementa com o aumento de M_v, como é mostrado para 25 ppm. Porém, para a concentração de 50 ppm a diferença de DR é praticamente nula. Acredita-se que esse resultado é devido às proximidades das massas moleculares.

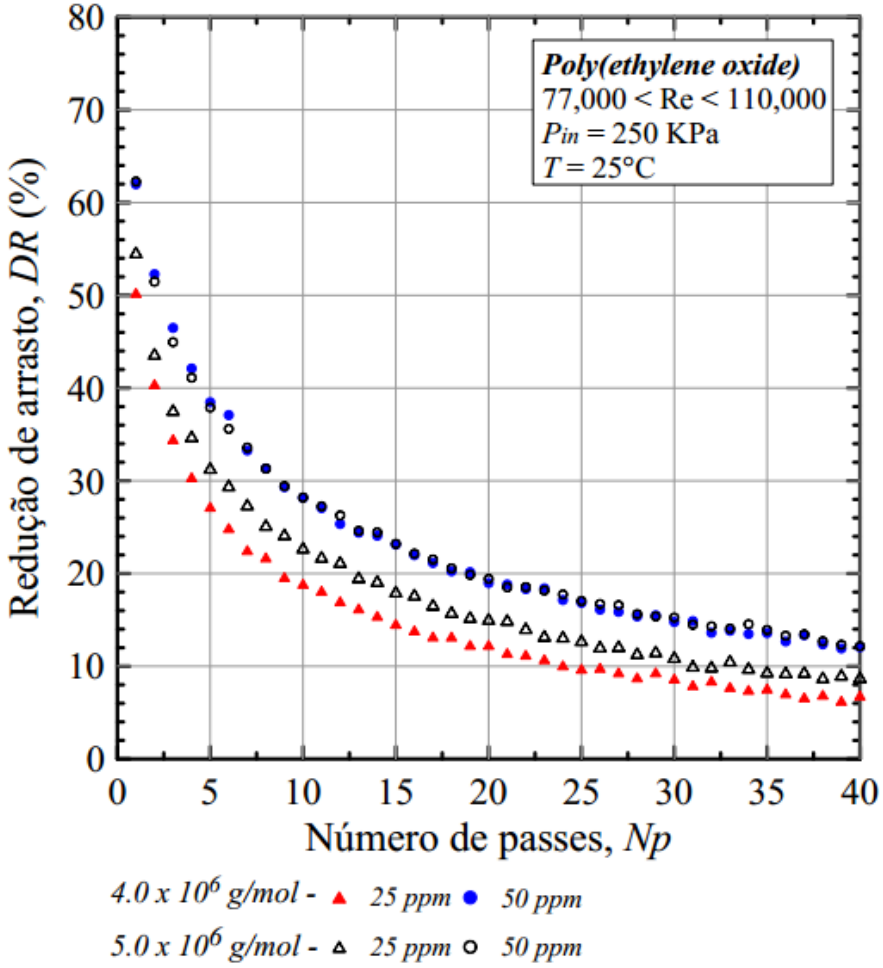


Figura 3.10 – Variação de DR com o número de passes. Efeito da massa molecular para uma solução de PEO.

Vanapalli, Islam e Solomon (2005) indicam que para soluções de PEO e PAM a massa molecular crítica ou assintótica, M_{vs}, não depende da concentração do polímero. Mas, os resultados obtidos neste trabalho vão em desacordo com os

indicados pelo referido autor. Pois observando-se as Figuras 3.4 e 3.5 percebe-se que o DR_{asy} obtido nos últimos passes atinge valores diferentes para cada concentração. Se ocorresse o que Vanapalli, Islam e Solomon (2005) sustentam, os resultados de DR_{asy} deveriam ser similares. Pereira, Andrade e Soares (2013) fazem um experimento para uma solução de PEO fixando o Re, a M_v e a temperatura da solução. A concentração da solução é variada desde 2 ppm até 100 ppm em um dispositivo cilíndrico rotatório por mais de 4 h até garantir que seja alcançado o estado assintótico. Observa-se que os valores de DR_{asy} alcançados são diferentes para cada c, indicando que a M_{vs} é função da concentração. E como dito anteriormente, a similaridade dos resultados de DR obtidos na Figura 3.10 é devido à proximidade das duas massas moleculares dos polímeros.

3.2.1 Influência da redução de arraste (DR) no fator de atrito

Como será evidenciado posteriormente, para um teste com pressão constante, a vazão diminui com o aumento do número de passes, o que indica que o Re não é constante durante o experimento, pois varia devido à degradação. Com o objetivo de tomar em consideração o efeito da concentração para um número de Reynolds fixo, os resultados de DR obtidos das diferentes soluções poliméricas (ilustrados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6) são reorganizados e expostos em função do fator de atrito de Darcy variando com o número de Reynolds para os três polímeros em análises: PEO ($M_v = 4 \times 10^6$ g/mol), PAM ($M_v = 5 \times 10^6$ g/mol) e XG ($M_v = 2 \times 10^6$ g/mol), como é mostrado nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13. Cinco diferentes soluções são estudadas de: $(25, 50, 75, 100\ e\ 200)$ ppm para cada polímero. As estrelas vazias mostradas nas figuras indicam o fator de atrito medido para a água pura e a estrela cheia representa o valor de f da água estabelecido para a mesma pressão de entrada em que são feitos os experimentos com as diferentes soluções, ou seja, de 250 KPa. A linha pontilhada e continua são as curvas de ajuste do solvente e da assíntota de Virk respetivamente. O número de passes, Np, aumenta da direita para a esquerda, ou seja, o símbolo inicial da direita de cada figura é o primeiro Np. Nota-se que a distância entre os pontos diminui entre cada passe, pois sabe-se que f_0 tende a um valor constante quando a cisão macromolecular cessa ou não há mais desaglomeração (no caso XG).

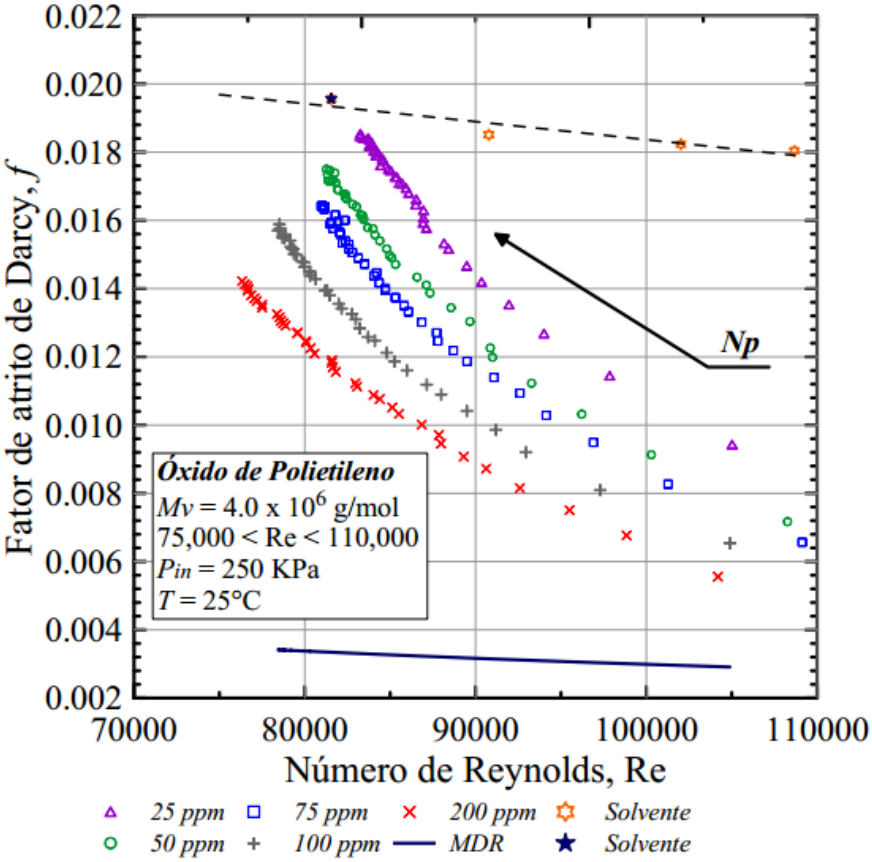


Figura 3.11 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o PEO.

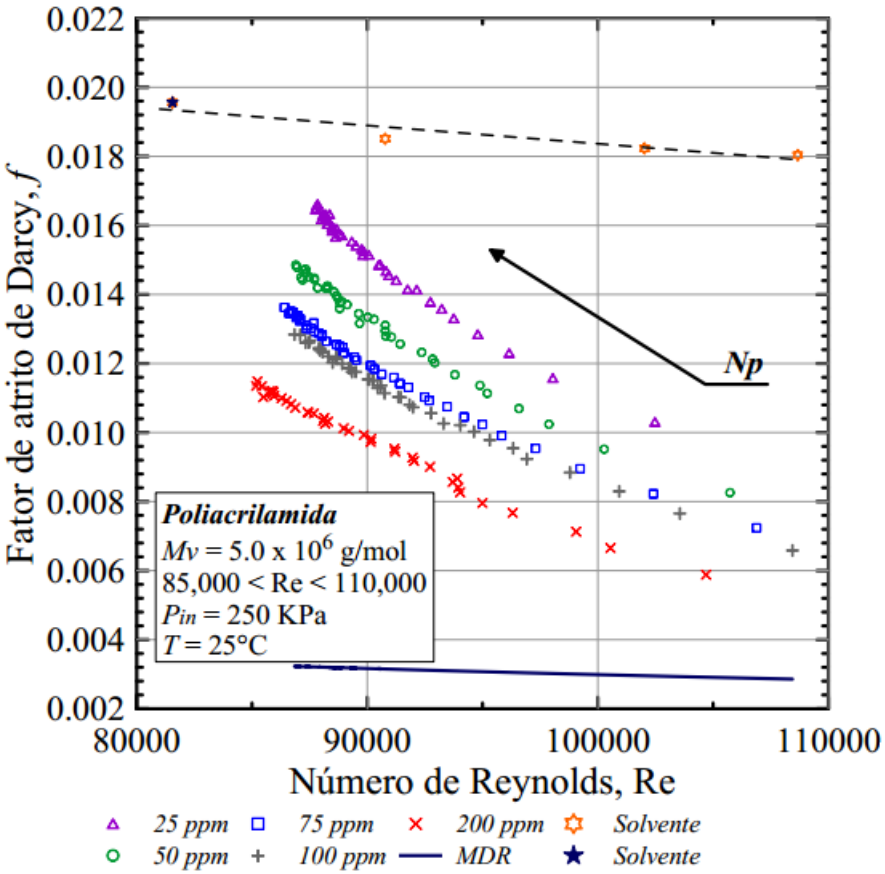


Figura 3.12 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o PAM.

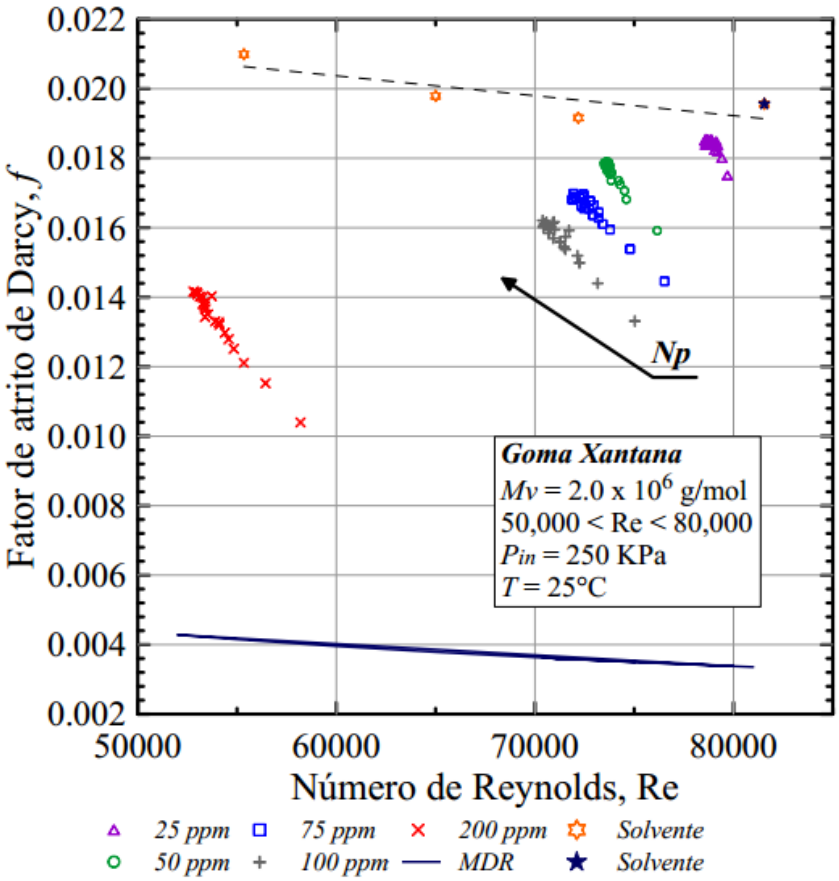


Figura 3.13 – Variação do fator de atrito com o número de passes para o XG.

Os fatores de atritos obtidos para os diferentes polímeros se encontram delimitados por um limite máximo e um limite mínimo. O primeiro deles está determinado pelos valores máximos de f que atingiria a solução, (que seriam os resultados obtidos para a água), e o mínimo é o fator de atrito de Virk, que é dado pela expressão $f_{virk} = 1{,}68 * (Re)^{-0{,}55}$. Este é o menor fator de atrito que pode ser alcançado (identificado na parte inferior das figuras com uma linha de curso constante). Como é esperado, o fator de atrito da solução, f_0, aumenta com o incremento dos números de passes e diminui com o aumento da concentração. Por outro lado, analisando-se o f_0 dos diferentes polímeros para uma mesma concentração, conclui-se que o f_0 do PAM atinge os menores valores quando a solução alcança o estado estável (nos últimos passes). Por exemplo, analisando-se a concentração de 200 ppm para os polímeros flexíveis, a diferença $(f_0 - f_{virk})$ é menor para as soluções do PAM do que para as soluções de PEO. Isto é esperado, pois o referido polímero é o que menos degrada. No entanto, o f_0 do PEO alcança os valores mais baixos nos primeiros passes, pois é o polímero que atinge os maiores valores de DR. Em relação à XG,

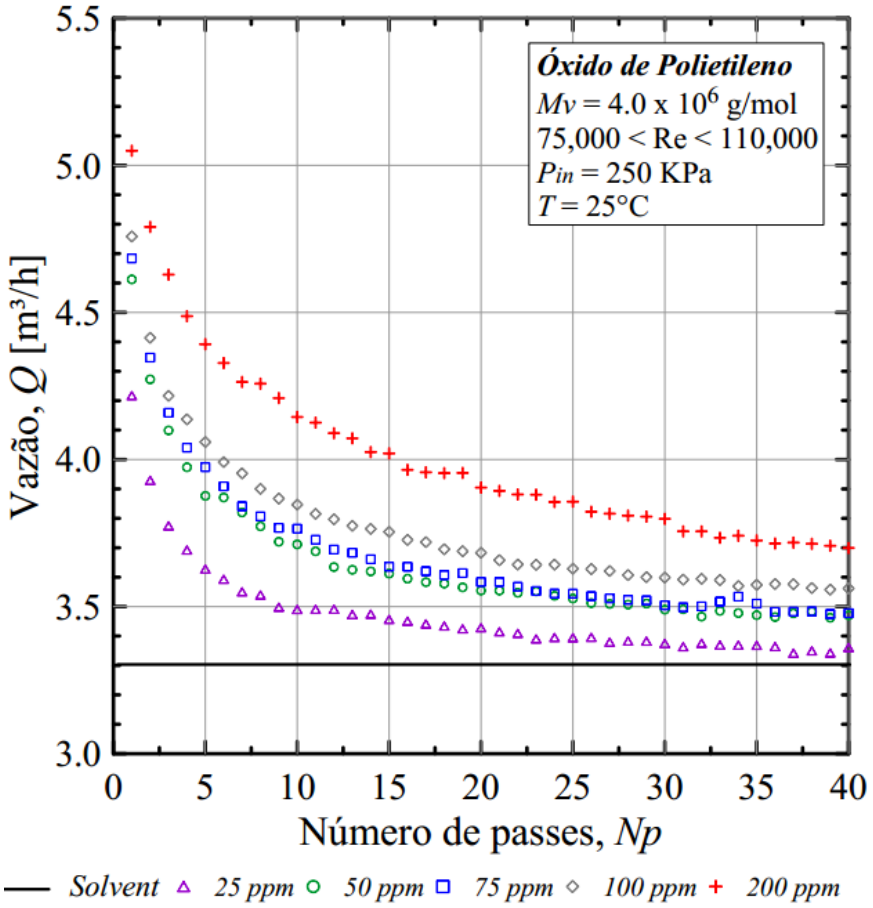
os valores de f_0 atingidos nos primeiros passes são notavelmente maiores em comparação com PEO e PAM, aproximadamente $0{,}01$ para 200 ppm (cruzes diagonais vermelhas). Porém, no estado estável os valores de f_0 são muito similares com os obtidos para a solução de PEO, aproximadamente $0{,}014$ para 200 ppm. Ao que parece, as soluções de XG podem alcançar valores assintóticos de f_0 menores que em soluções de PEO, pois a massa molecular da XG testada neste trabalho é menor que a utilizada para o PEO (a metade do valor de PEO). Observa-se também que o máximo número de Reynolds atingido depende da concentração do polímero (observado no primeiro Np), pois aumentando-se a concentração na solução se alcançam maiores números de Reynolds e, portanto, também se incrementa a viscosidade da solução, até um ponto em que esse valor da viscosidade se torna tão importante que ao incrementar ainda mais a concentração, o Re atingido começa a diminuir. Por exemplo, na Figura 3.11 o número de Reynolds máximo alcançado aumenta a medida em que se incrementa a concentração de 25 ppm para 50 ppm e de 50 ppm para 75 ppm, (obtendo-se um Re quase de 110000), quando se aumenta a concentração para 100 ppm e 200 ppm o efeito da viscosidade atua, fazendo com que os valores do Reynolds máximos diminuam. Para o XG o efeito ocorre desde 25 ppm, pois este polímero é notavelmente mais viscoso, quando é comparado com PEO e PAM. Então, é observado que o Re máximo atingido diminui quando a concentração é aumentada.

3.2.2 Comportamento da vazão e queda de pressão através da seção de teste

Os mesmos resultados expostos nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 são analisados novamente desde um ponto de vista mais prático, em termos de vazão e queda de pressão através da seção de teste. Pois sabe-se que na indústria o que permite diminuir custos no transporte de escoamentos em tubulações é o ganho de vazão e a diminuição da queda de pressão.

As Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 mostram respectivamente, a vazão Q (figuras superiores) e a queda de pressão na seção de teste $\Delta p/l$ (figuras inferiores) em função dos números de passes pela bancada. As três soluções, PEO ($M_v = 4 \times 10^6$ g/mol), PAM ($M_v = 5 \times 10^6$ g/mol) e XG ($M_v = 2 \times 10^6$ g/mol) são estudadas. Também as diferentes concentrações de polímeros são examinadas e comparadas com o solvente utilizado (água filtrada). Em cada figura, a linha continua é

relacionada ao solvente, água pura, estabelecida na mesma pressão de entrada. Como esperado, à pressão de entrada fixa, a vazão é maior quando a solução polimérica escoa através da tubulação. Obviamente a diferença entre a vazão atingida com a solução e a água pura aumenta com a concentração e diminui com o transcorrer do teste, o qual é esperado, pois o polímero degrada passe por passe antes de atingir a massa molecular assintótica, em cerca de 40 passes. Portanto, o comportamento qualitativo da vazão com a concentração e os números de passes é consistente com o já reportado do fenômeno. O que merece maior atenção nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 é o comportamento da queda de pressão na região totalmente desenvolvida. É importante analisar que a queda total de pressão através da bancada experimental é fixa ($\Delta p_{total} = p_{in} - p_{atm}$). Onde p_{in} é a pressão de entrada e p_{atm} é a pressão atmosférica. Apesar de que Δp_{total} permanece sempre constante durante todo o experimento, a queda de pressão na região do escoamento totalmente desenvolvido diminui quando a solução polimérica é utilizada. Isto não é obvio a primeira vista, pois os testes são conduzidos com pressão de entrada fixa.



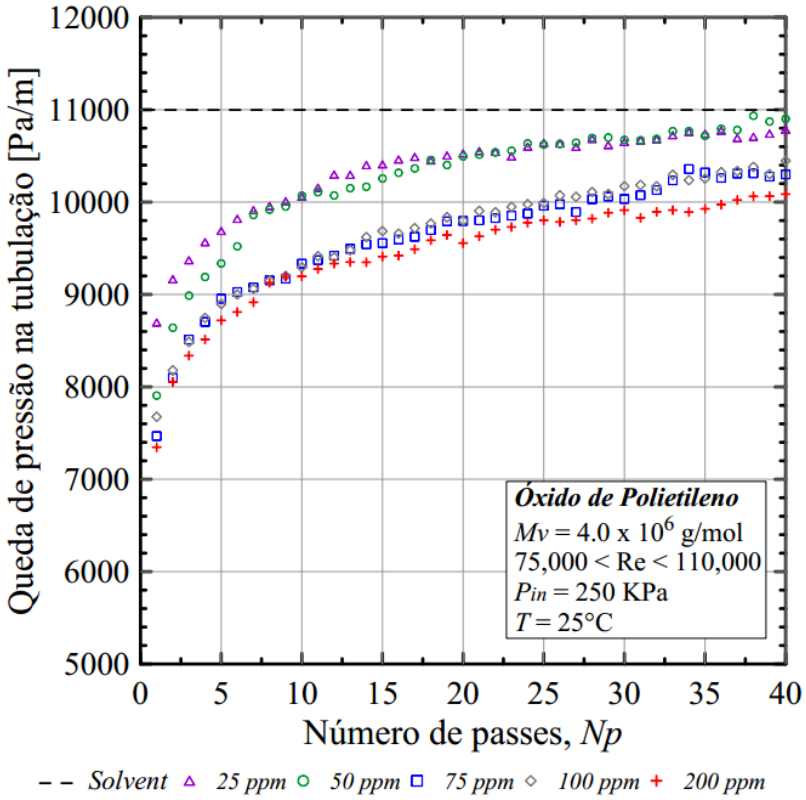
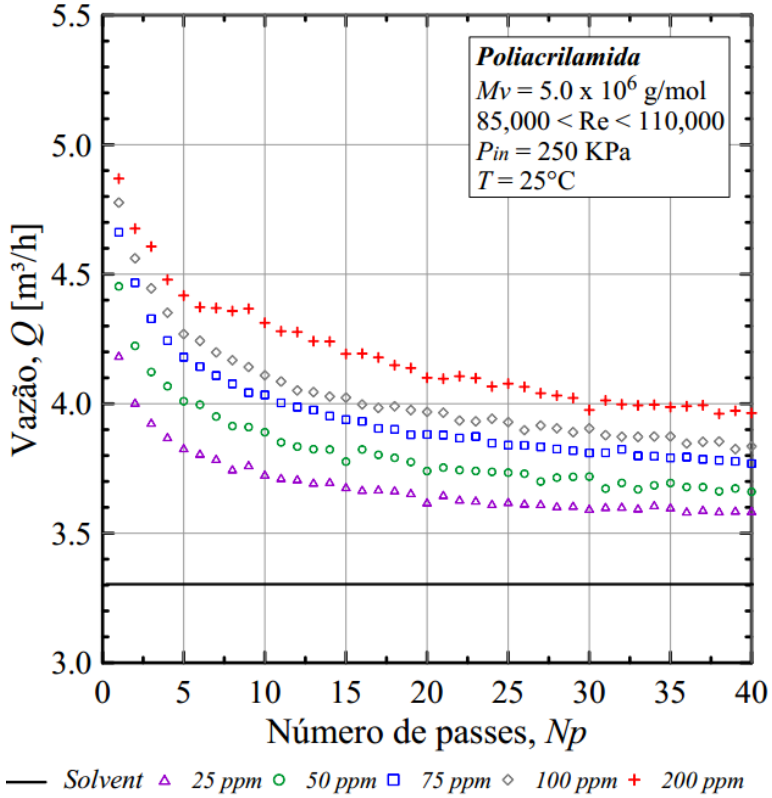


Figura 3.14 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de PEO.



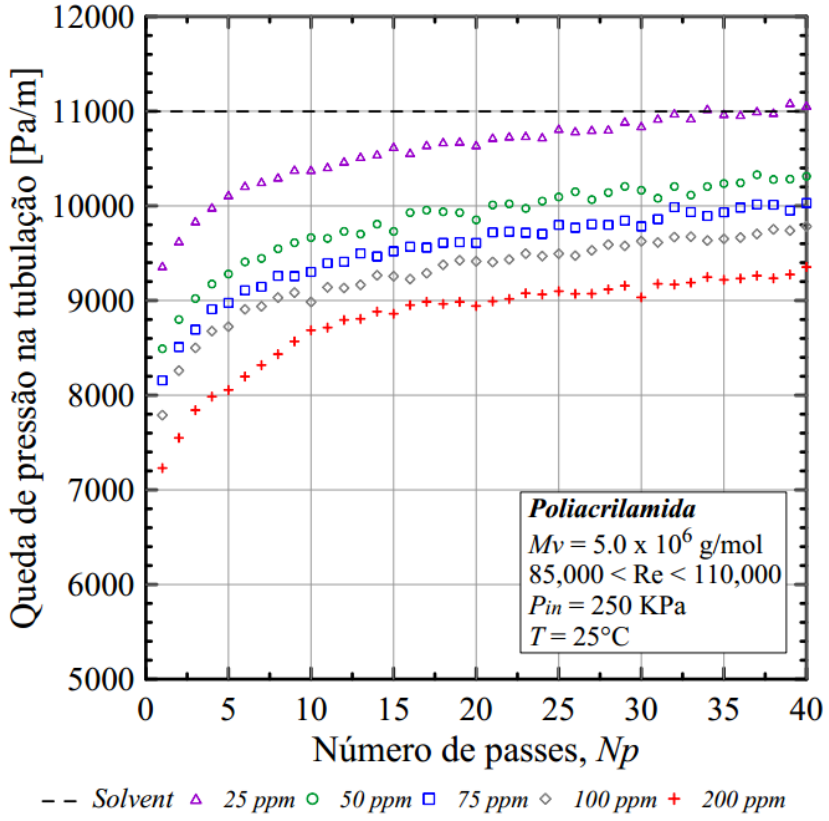
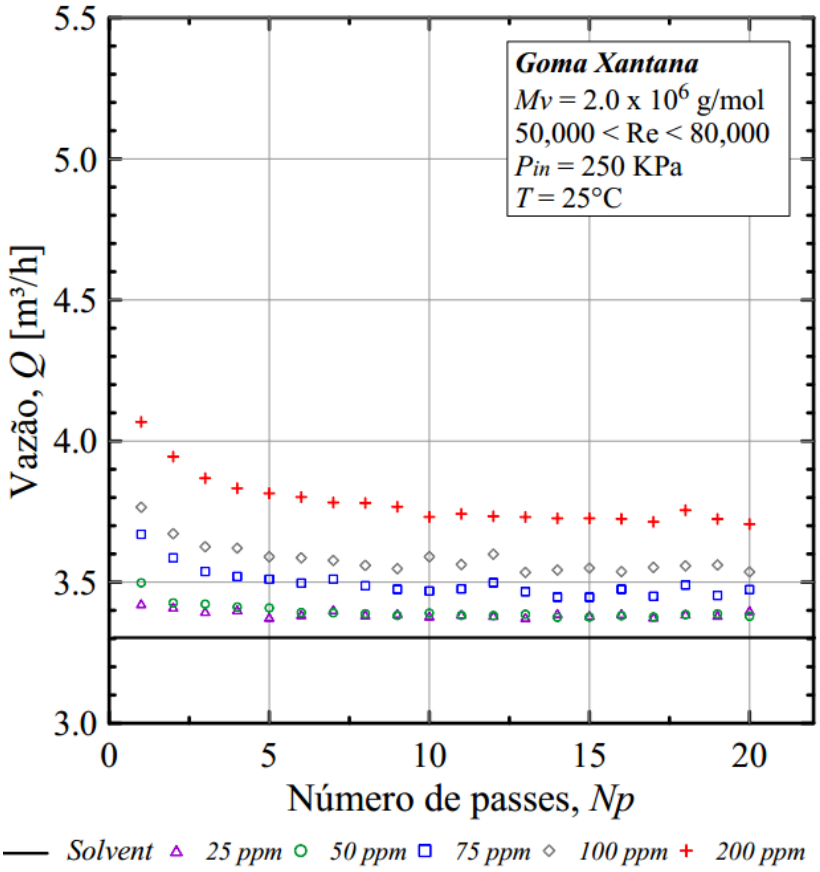


Figura 3.15 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de PAM.



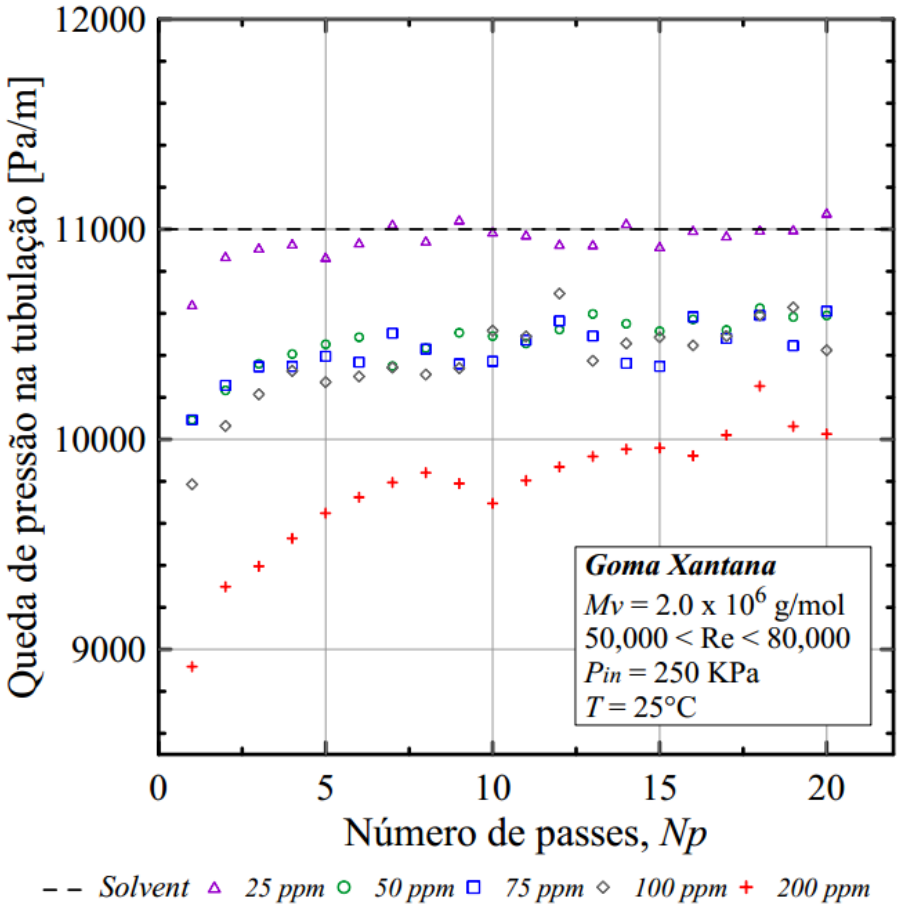


Figura 3.16 – Variação do ganho de vazão e queda de pressão durante o transcorrer do teste para as soluções de XG.

Analisando-se as Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 correspondentes ao ganho de vazão, observam-se que os valores iniciais de Q para o PEO e PAM estão próximos, em torno de 5 m^3/h. Nas soluções de PEO este valor é reduzido ao final do teste para $3{,}7$ m^3/h (26% menor), enquanto para as soluções de PAM o valor final é de 4 m^3/h (19% menor do valor inicial). Diferentemente, nas soluções de XG a vazão diminui de $4{,}1$ para $3{,}7$ m^3/h, a qual corresponde à uma redução apenas de 10% de seu valor inicial. De fato os valores assintóticos de XG são muito similares aos atingidos por as soluções de PEO. Este comportamento do polímero que pode ser atraente nas aplicações industriais, pois a molécula de XG pode interagir com o vórtice durante uma longa distância sem mostrar diminuição significativa da vazão. Por outro lado observando-se as Figuras 3.14, 3.15 e 31.6 nota-se uma diminuição na queda de pressão, $\Delta p/l$, (medida na secção de teste), que se intensifica com a adição da concentração, mas que aumenta com o avanço dos números de passes, apesar de que os testes são feitos à pressão constante. Resultados consistentes

com os reportados por Vanapalli Islam e Solomon (2005), que indicam que aparentemente a degradação da massa molecular afeta às propriedades do escoamento em modo geral, ou seja, pressão, vazão e fator de atrito.

Analisando-se a equação de perda de carga, $\Delta p/\rho = f\frac{l}{D}\frac{u^2}{2}$, para o escoamento em estudo (com diâmetro e comprimento constante), percebe-se que para uma temperatura fixa o fator de atrito só é função do gradiente de pressão e velocidade ao quadrado. Com o transcorrer do experimento se evidencia uma diminuição no ganho de vazão e aumento na queda de pressão, como foi anteriormente explicado. Com o desejo de explorar melhor os resultados, é analisada o Δp versus Q para duas concentrações de 25 ppm e 100 ppm dos diferentes polímeros em estudo, como se ilustra na Figura 3.17.

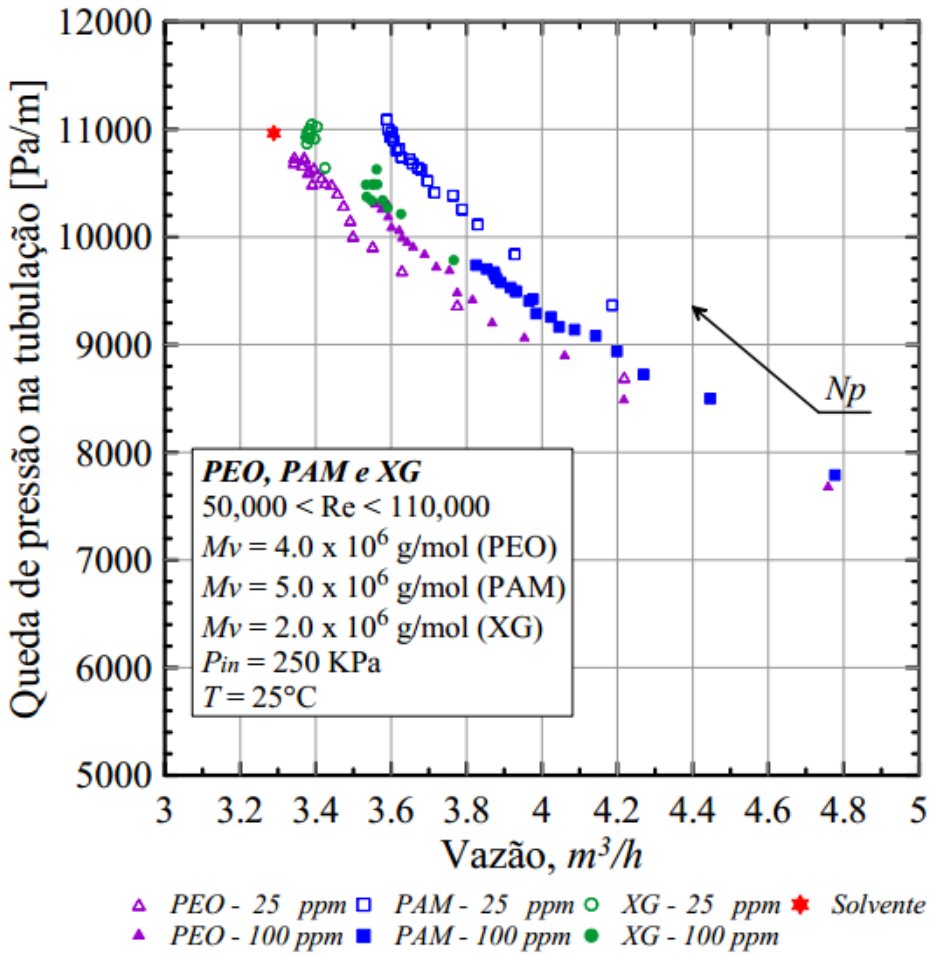


Figura 3.17 – Variação da vazão e queda da pressão durante o transcorrer do teste para as três soluções em estudo.

Observa-se que para baixas concentrações as soluções de PEO são as que mais apresentam redução na queda de pressão, porém a vazão diminui mais, junto com o XG. No outro extremo, ou seja, nas concentrações altas, os polímeros elásticos em análises mostram maior diminuição na queda de pressão, entretanto o PAM assintotisa em um valor consideravelmente alto de vazão e menor na queda de pressão. Finalmente conclui-se que o DR se traduz em ganho de vazão e diminuição na queda de pressão, que com o decorrer do teste pelo efeito da degradação da cadeia polimérica, o ganho de vazão diminui e a queda de pressão aumenta, fazendo também com que a taxa de cisalhamento na parede da tubulação incremente. Resultados de acordo com os apresentados na literatura por Moussa e Tiu (1994) e Brostow (2008).

Depois de ter analisado as principais propriedades do escoamento desde o ponto de vista prático, conclui-se que entre os polímeros flexíveis estudados, as soluções de PAM são mais eficientes, como é observado na Figura 3.15 onde os valores de ganho de vazão como os de queda de pressão mostram melhor estabilidade ao longo dos experimentos. Resultados coerentes com os observados por Vanapalli, Cessio e Solomon (2006) e Kenis (1971).

3.3 Redução de Arrasto Relativa

Nesta secção são apresentados os resultados de redução de arraste relativa em função do número de passes desde o máximo nível de eficiência até um valor assintótico. Os valores de DR (expostos nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6) obtidos com o transcorrer do teste $DR(t)$ são divididos por $DR_{máx}$, para obter a redução de arrasto relativa, DR', como é descrito na Equação 6. Portanto, os valores de DR' variam de 0 a 1. Cada curva tem início em $DR'_{máx} = 1$ variando até DR'_{asy}. A diferença $1 - DR'_{asy}$ indica a máxima perda de eficiência em redução de arraste causada pelas cisões macromoleculares ou uma possível desagregação do polímero.

Nas Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 são apresentados os valores de redução de arraste relativo variando com o número de passes para as soluções de: PEO ($M_v = 4 \times 10^6$ g/mol), PAM ($M_v = 5 \times 10^6$ g/mol) e XG ($M_v = 2 \times 10^6$ g/mol), respetivamente.

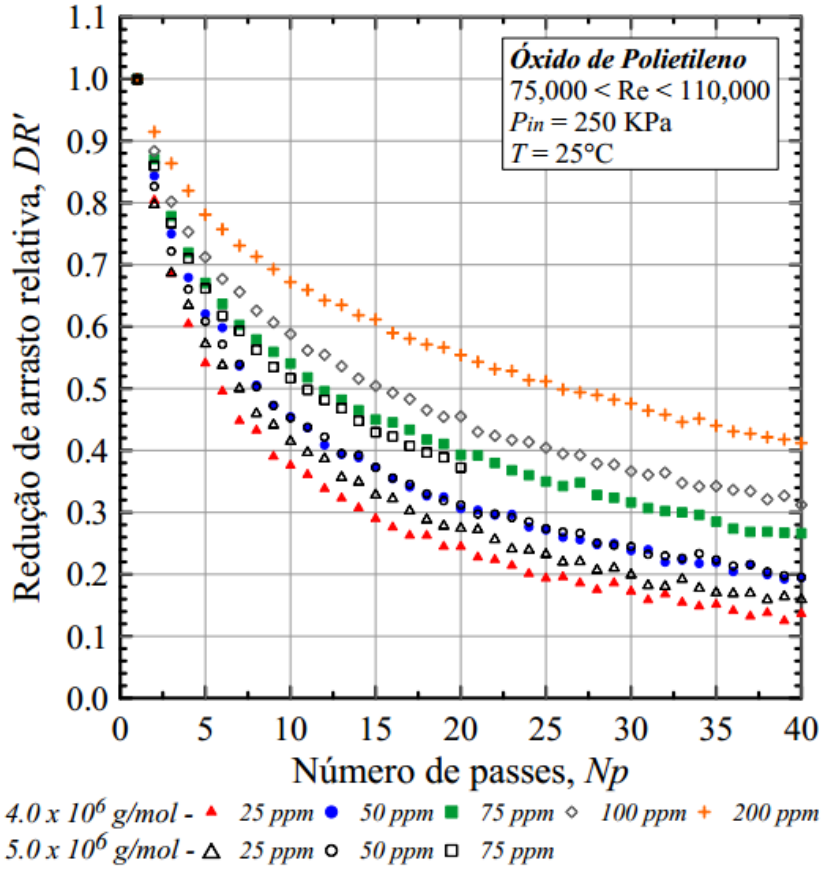


Figura 3.18 – Degradação das soluções de PEO durante o transcorrer do teste.

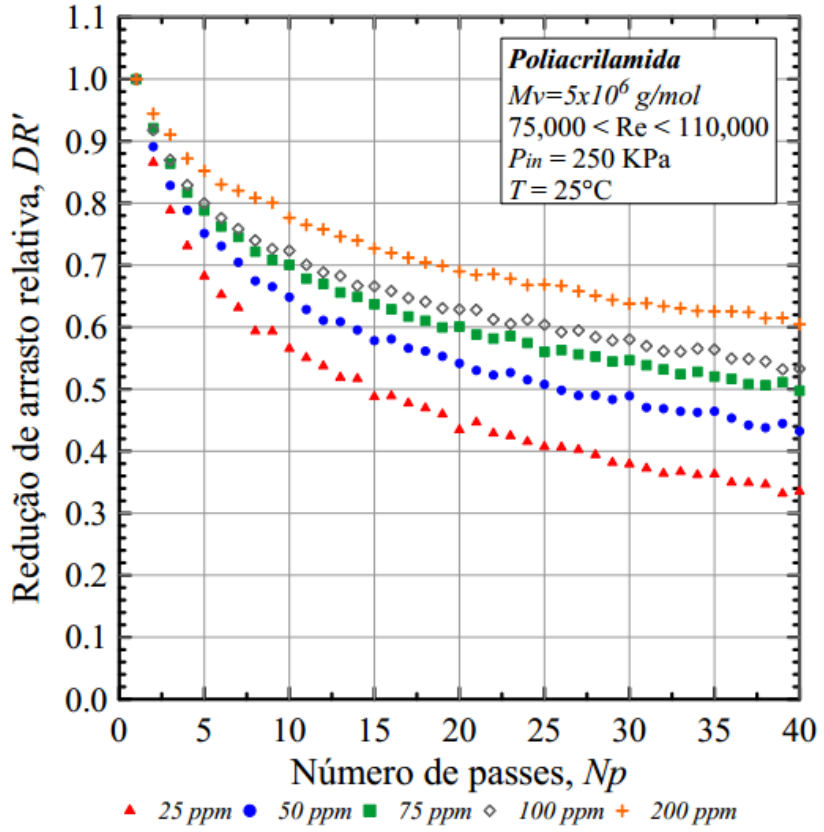


Figura 3.19 – Degradação das soluções de PAM durante o transcorrer do teste.

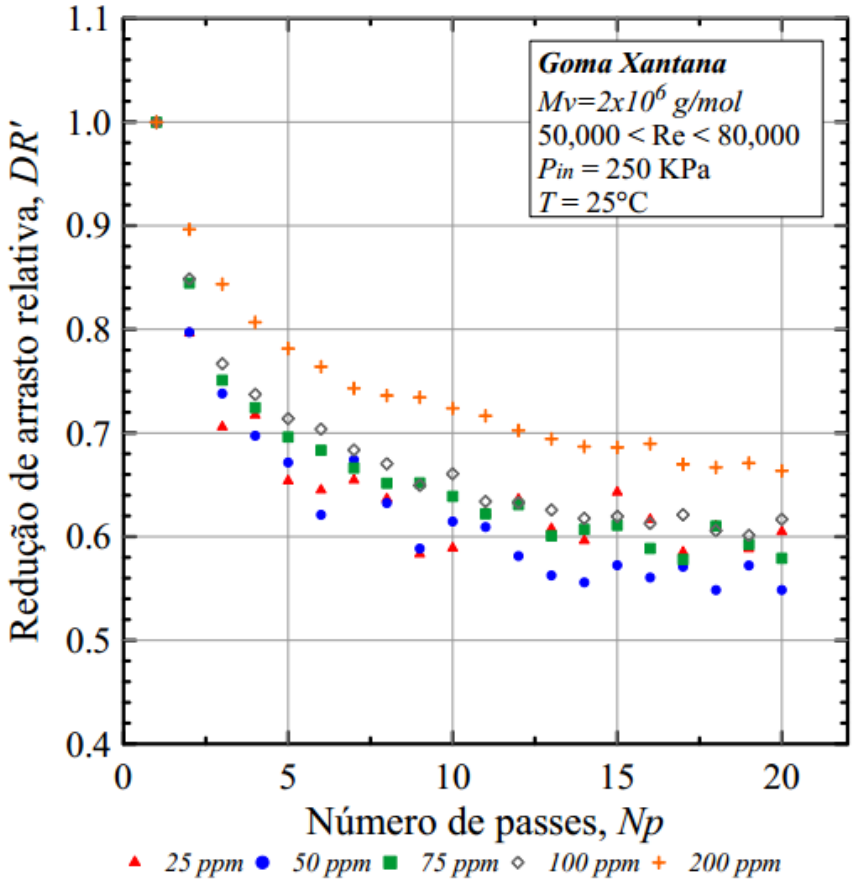


Figura 3.20 – Desaglomeração das soluções de XG durante o transcorrer do teste.

Dos polímeros flexíveis, observa-se que o aumento da concentração causa uma menor degradação na cadeia do polímero, ou seja, há menor número de cisões macromoleculares. (Sustentação que é oposta à afirmada por Vanapalli, Cessio e Solomon (2006) como explicado anteriormente). O resultado indica que quando há um maior número de moléculas na solução a degradação se faz mais lenta. Nas soluções de PAM se evidencia maior resistência à degradação quando se atinge o estado estável, em toda a faixa de concentração estudada, por exemplo: para uma concentração de 100 ppm, a solução de PAM degrada aproximadamente 40% menos do que a solução de PEO. O mesmo comportamento foi observado por Pereira e Soares (2012) utilizando um reômetro com geometria de dupla folga. Por outro lado, para o polímero de cadeia molecular rígida (Figura 3.20), é possível observar que os resultados de DR' não estão quantitativa nem qualitativamente semelhantes, em comparação com os dados obtidos para os polímeros flexíveis, indicando que embora a redução de arraste aumente com a concentração, a desagregação da XG nas diferentes concentrações é muito similar em cada Np,

exceto para a concentração de 200 ppm. Além disso, é interessante notar que a solução de 25 ppm assintotisa num valor ligeiramente maior do que as outras concentrações. Fazendo uma comparação qualitativa dos resultados obtidos por Pereira, Andrade e Soares (2013) é possível observar que há bastante semelhança. Os autores analisam uma ampla faixa de concentração onde indicam que para concentrações menores de 5 ppm o polímero não degrada, e para $10 \leq c < 37{,}5$ ppm a desaglomeração aumenta com o incremento da concentração, depois deste valor ($c = 37{,}5$ ppm), a desagregação da solução começa a diminuir com o aumento da concentração. Evidencia-se então à complexa relação que existe entre a alteração da concentração de XG e a desaglomeração. Indicando-se que há um comportamento diferente de XG às baixas concentrações em relação aos polímeros flexíveis.

Finalmente, comparando-se a mesma concentração para os três polímeros de interesse, analisa-se que o XG é o aditivo que menos perde eficiência (12% acima de PAM, para a concentração de 100 ppm). Tais resultados estão de acordo com os indicados por Paschkewitz, Dubief e Shaqfeh (2005), onde indicam que a elasticidade, embora aumente os níveis de redução de arraste, intensifica a degradação polimérica.

3.3.1 Função de decaimento para o ajuste da redução de arrasto relativa

Nesta secção se apresenta uma equação que se ajusta aos resultados experimentais obtidos de DR' do PEO, PAM e XG em função do número de passes. Os dados são ajustados mediante a Equação 10 que segue a mesma forma como a proposta por Pereira e Soares (2012), que pesquisaram sobre redução de arrasto em soluções de PEO através de um dispositivo rotatório com uma geometria de dupla folga.

$$DR' = DR'_{asy} + \left(1 - DR'_{asy}\right)\left[1 + (\alpha Np - 1)^{\beta}\right]^{\gamma}. \qquad (10)$$

Os parâmetros $\alpha, \beta, e\ \gamma$ (indicados na Tabela 3.1) dependem das variáveis que afetam o fenômeno como: número de Reynolds, massa molecular, concentração e temperatura. DR'_{assy} é obtido com a seguinte relação:

$$DR'_{assy} = \frac{f(c)}{DR_{máx}}. \tag{11}$$

Onde $f(c) = \lambda_4 c^2 + \lambda_5 c + \lambda_6$. O valor de $DR_{máx}$ é calculado usando exatamente a mesma equação proposta por Pereira e Soares (2012) (Equação 12). A única diferença são os valores das constantes λ_1, λ_2 e λ_3 que são dependentes da solução como se mostra na Tabela 3.1. Indicando assim, que esta equação é independente da geometria utilizada.

$$\frac{DR_{max}}{cM_v} = \frac{\lambda_1 Re^{3/5} T^{3/2}}{\lambda_2 c M_v + \lambda_3} \tag{12}$$

Os parâmetros e as constantes para cada polímero em análise são:

Tabela 3.1 Valores das constantes utilizadas nas equações. (Sendo as constantes $A = 1,35x10^{-8}\ mol/g$ e $B = 8x10^{-3}\ [mol/g]^{0.145}$).

Polímero	α	β	γ	$\lambda_1\ [K]^{3/2}$	$\lambda_2 [mol/g]$	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
PEO	$AM_v - B$	$0,8c^{0,21}M_v^{0,145}$	-2,3	$2x10^{-6}$	14	750	$-6x10^{-6}$	2856,8	-0,0571
PAM	$^1/_{18}$	$1,92c^{0,0639}$	-2,4	$1x10^{-7}$	0,7	52	$-1x10^{-7}$	3976,4	0,0552
XG	$^1/_9$	$13,587c^{0,2785}$	-2,4	$1,3x10^{-7}$	0,45	210	$-4x10^{-6}$	2302,9	0,0137

As unidades para $M_v, c\ e\ T_{abs}$ são respetivamente: $kg_{soluto}/kg_{solução}$, $g/mol\ \ e\ k$.

Os dados ilustrados nas Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 são ajustados considerando um número de Reynolds de 100000, dado que não foi constante durante o teste. Apesar disso, os dados estão bem ajustados para cada $c\ e\ M_v$ dos diferentes polímeros. Até o comportamento atípico das soluções de XG provocado pelas concentrações estudadas é capturado. É interessante ressaltar o fato de que os dados ajustados para escoamentos turbulentos em tubulações retas são bem ajustados pelas equações utilizadas em uma geometria totalmente diferente, (cilindro rotatório de dupla folga). O que indica uma forte sugestão do uso de dispositivos rotatórios para obter dados qualitativamente semelhantes.

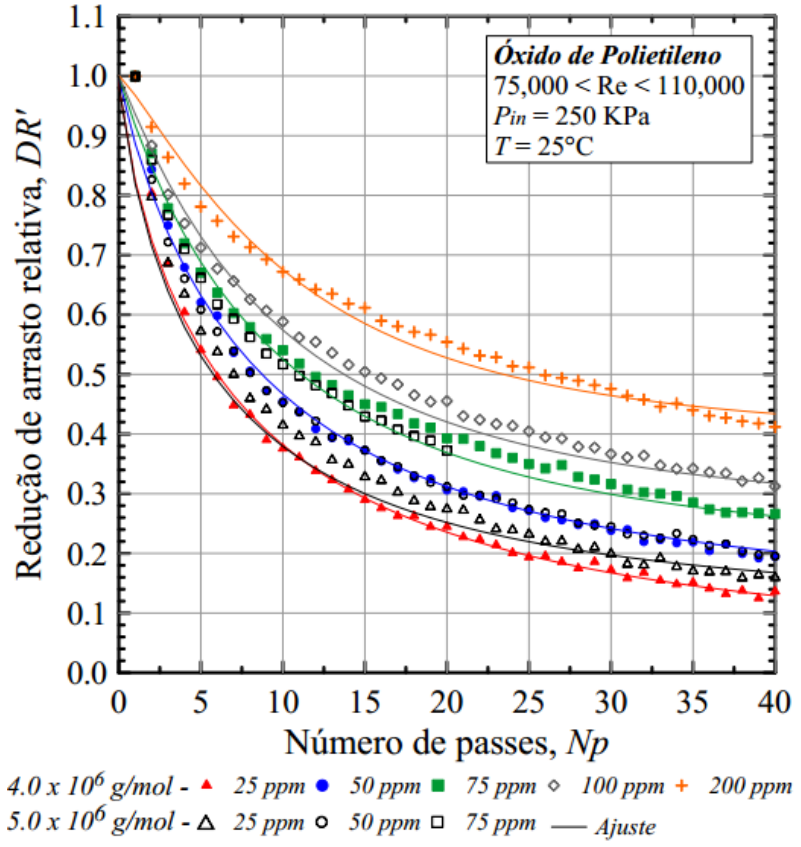


Figura 3.21– Ajuste dos valores de DR' para as soluções de PEO.

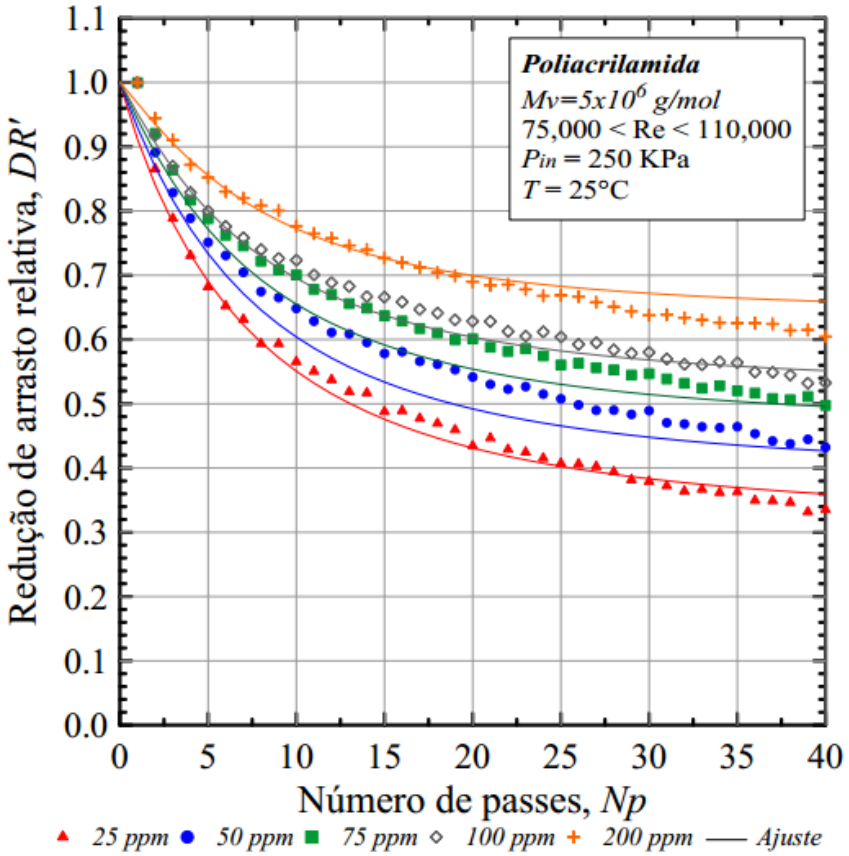


Figura 3.22 – Ajuste dos valores de DR' para as soluções de PAM.

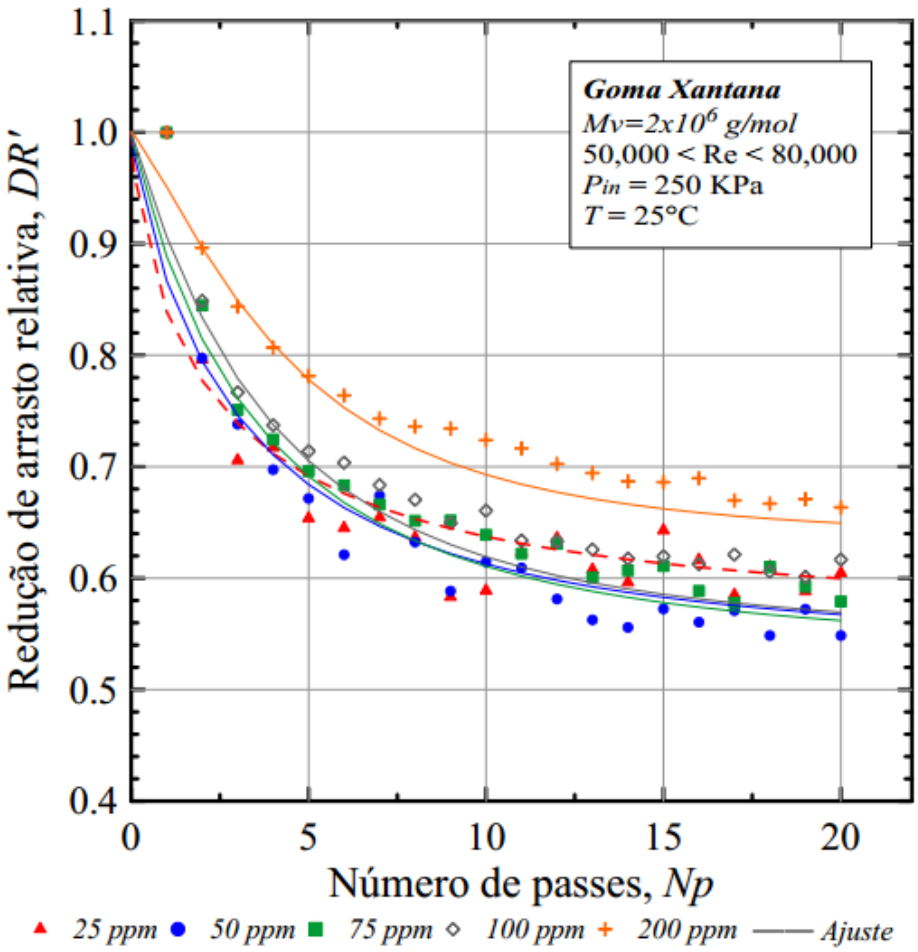


Figura 3.23 – Ajuste dos valores de DR' para as soluções de XG.

Nota-se nas Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 que o modelo tem um bom ajuste com os dados experimentais e ressalta-se ainda na Figura 3.23 de XG que a concentração de 25 ppm (curva indicada com linhas tracejadas) atinge o estado estável em um valor maior que as concentrações de 50 ppm, 75 ppm e 100 ppm, mostrando valores diferentes com referência aos polímeros flexíveis, como foi explicado anteriormente.

3.4 Redução de arrasto com mistura de polímeros

Na seções anteriores deste capítulo se apresentaram os resultados para os três polímeros em estudo de forma individual. Aqui é feita uma serie de experimentos misturando-se o polímero de Óxido de Polietileno com o de Goma Xantana e Poliacrilamida também com Goma Xantana. As soluções foram preparadas como descrito na seção dois, com a diferença de que foram depositados cuidadosamente em a água filtrada os dois polímeros em pó, em vez de depositar individualmente

cada um deles. Os valores de viscosidades medidos no reômetro são expostos na Tabela 2.1. As soluções foram deslocadas com ajuda do compressor a pressão constante de 250 KPa. A Figura 3.24 mostra os resultados para os polímeros individualmente (símbolos cheios cinza) e os de mistura de PEO com XG (símbolos vazios), para concentrações de 100 ppm. Observa-se inicialmente que os resultados obtidos misturando-se estes dois tipos de polímeros, nestas concentrações, são mais eficientes do que utilizando um simples polímero. Analisa-se também, que a medida em que se aumenta a concentração de XG e se diminui a de PEO, o polímero tende a atingir um estado estável em um maior valor de DR. Isto pode ser evidenciado com maior clareza na Figura 3.25, onde são expostos os resultados para concentrações de 200 ppm.

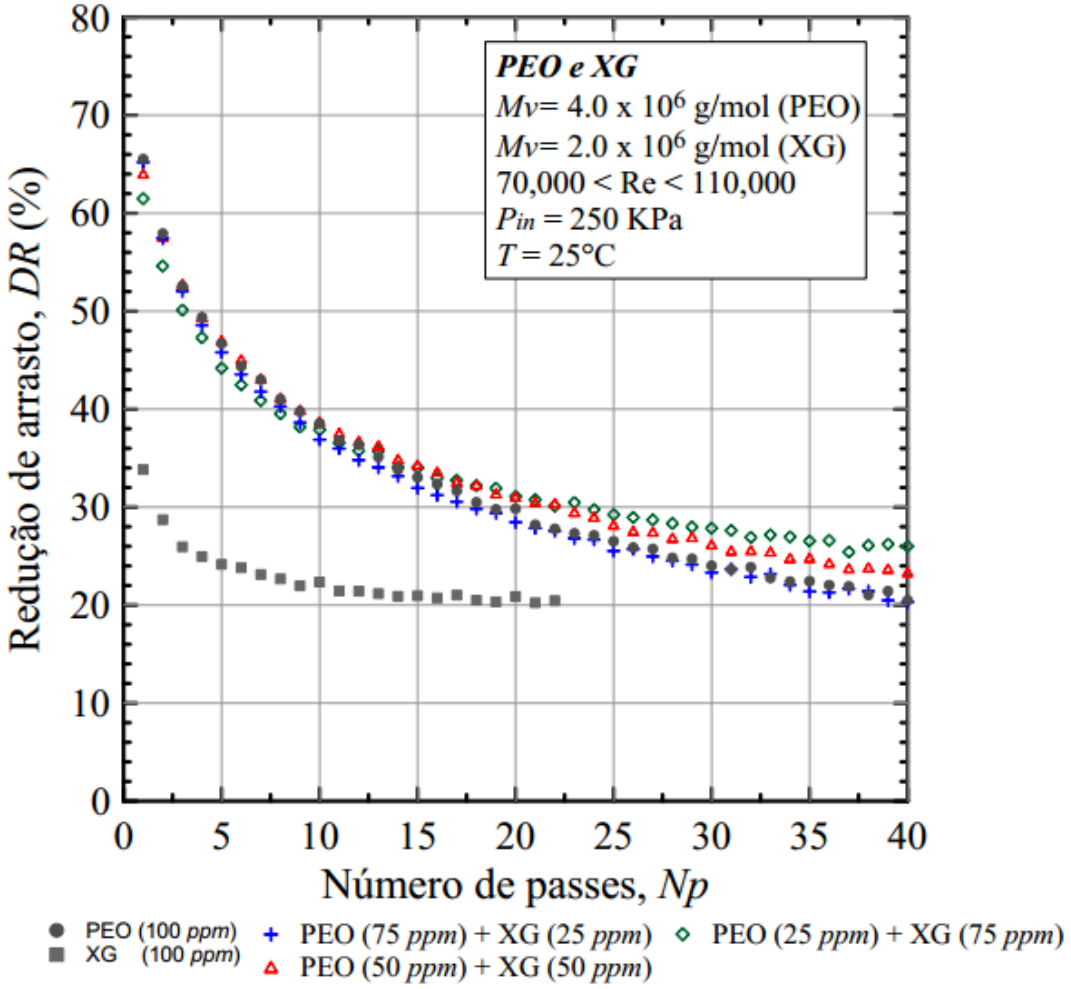


Figura 3.24 – Mistura de PEO com XG para concentrações de 100 ppm.

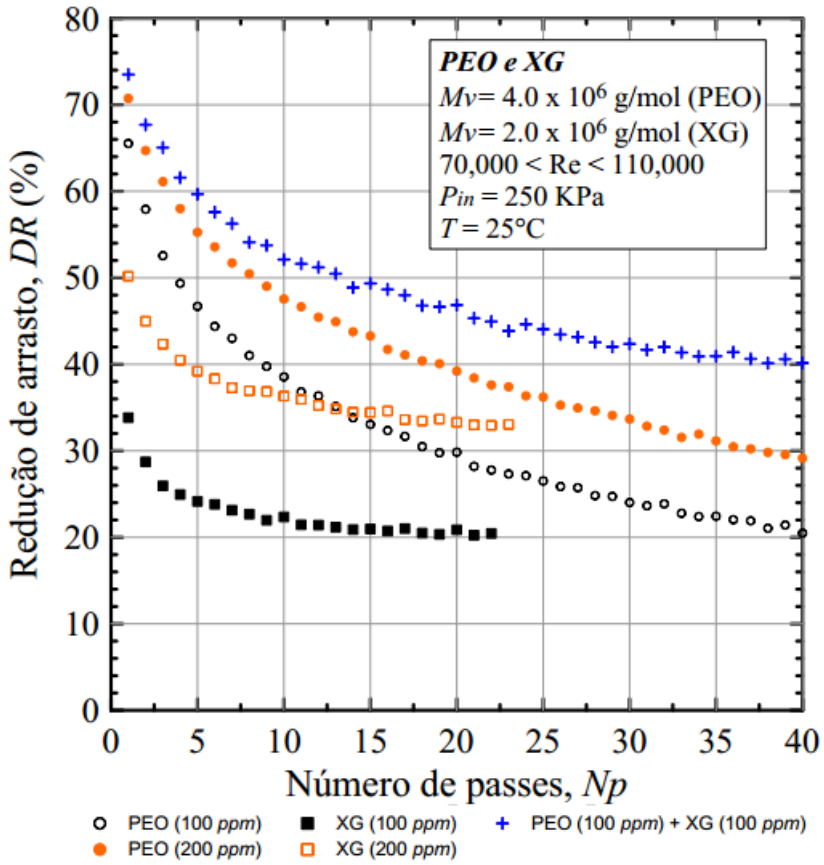


Figura 3.25 – Mistura de PEO com XG para concentrações de 200 ppm.

Constata-se novamente que há maior eficiência quando se misturam estes dois polímeros do que quando é utilizado um deles na mesma concentração da mistura (25% com respeito ao PEO e à XG), indicando-se como se o efeito das soluções quando se alcança o estado assintótico no fenômeno fosse aditivo. Por exemplo, o valor de DR para o XG e o PEO para uma concentração de 100 ppm é de 20% nos últimos passes. Por outro lado o valor de DR para a mistura dos dois polímeros neste mesmo Np é de 40%, que é a soma dos dois para um simples polímero. Nos primeiros passes não se observa este efeito, dado que está próximo da assíntota de Virk (aproximadamente 82%). Porém, os valores atingidos são bastante significantes, perto de 74%. Estes resultados são amplamente interessantes do ponto de vista prático, pois a XG é um polímero mais barato do que o PEO e não é tóxico. Entretanto, este biopolímero degrada biologicamente bastante rápido. Para melhorar esta desvantagem assim como a resistência à degradação, métodos de enxerto de copolímeros têm sido estudados (Deshmukh e Singh (1986)). Por outro lado, nas Figuras 3.26 e 3.27 se analisa o que acontece com a vazão e a queda da pressão quando os polímeros são misturados.

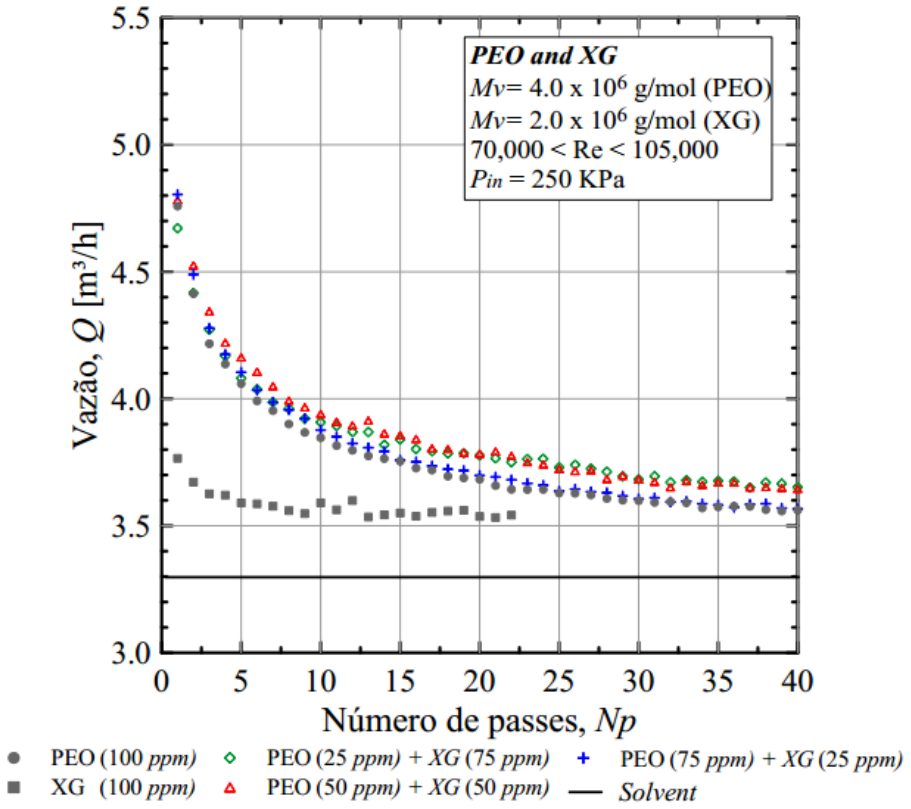


Figura 3.26 – Valores da vazão obtidos na mistura de PEO com XG para $c = 100$ ppm.

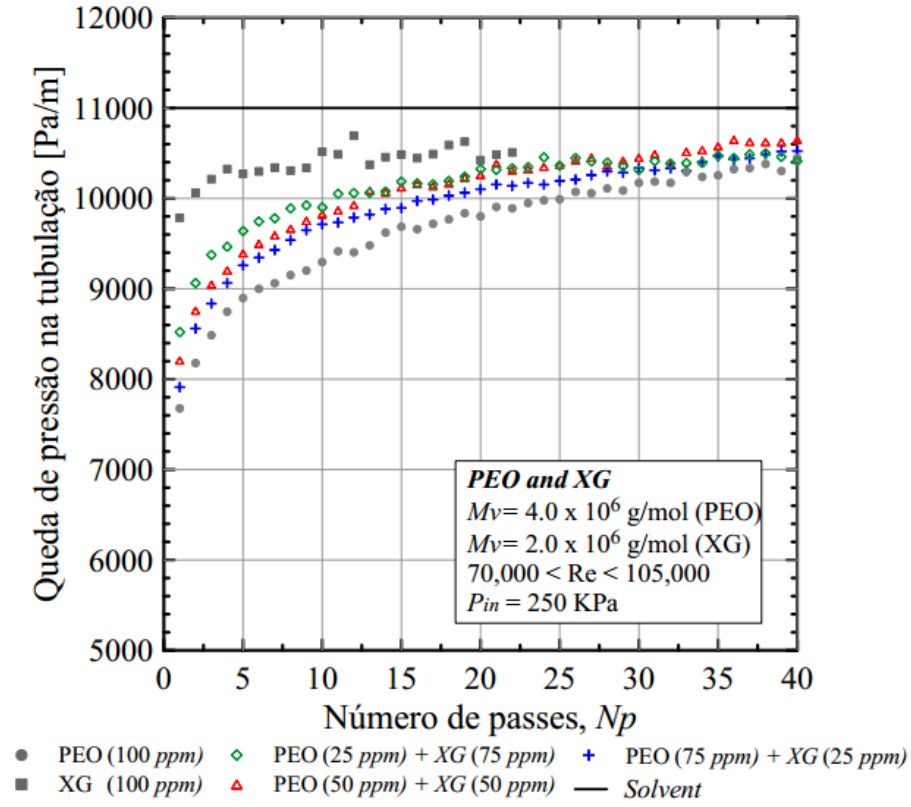


Figura 3.27– Valores da queda de pressão obtidos na mistura de PEO com XG para $c = 100$ ppm.

Na Figura 3.26 de vazão nota-se que os valores de mistura são maiores em comparação com os polímeros individualmente, mas, há um ponto no qual a viscosidade da solução misturada influencia e este valor de vazão não aumenta mais. Por exemplo, observa-se na figura que o resultado de vazão entre PEO (50 ppm) + XG (50 ppm) e PEO (25 ppm) + XG (75 ppm) é bastante semelhante. Esta proximidade entre os pontos seguramente está associado à XG, devido a seu alto valor de viscosidade em comparação com o PEO. Entretanto, para a figura de queda de pressão os resultados de mistura estão entre uma faixa delimitada pelos resultados obtidos para o PEO e XG, onde a queda de pressão aumenta quando se incrementa a concentração de XG.

Por fim, na Figura 3.28 são expostos os resultados de mistura para os polímeros de Poliacrilamida com Goma Xantana.

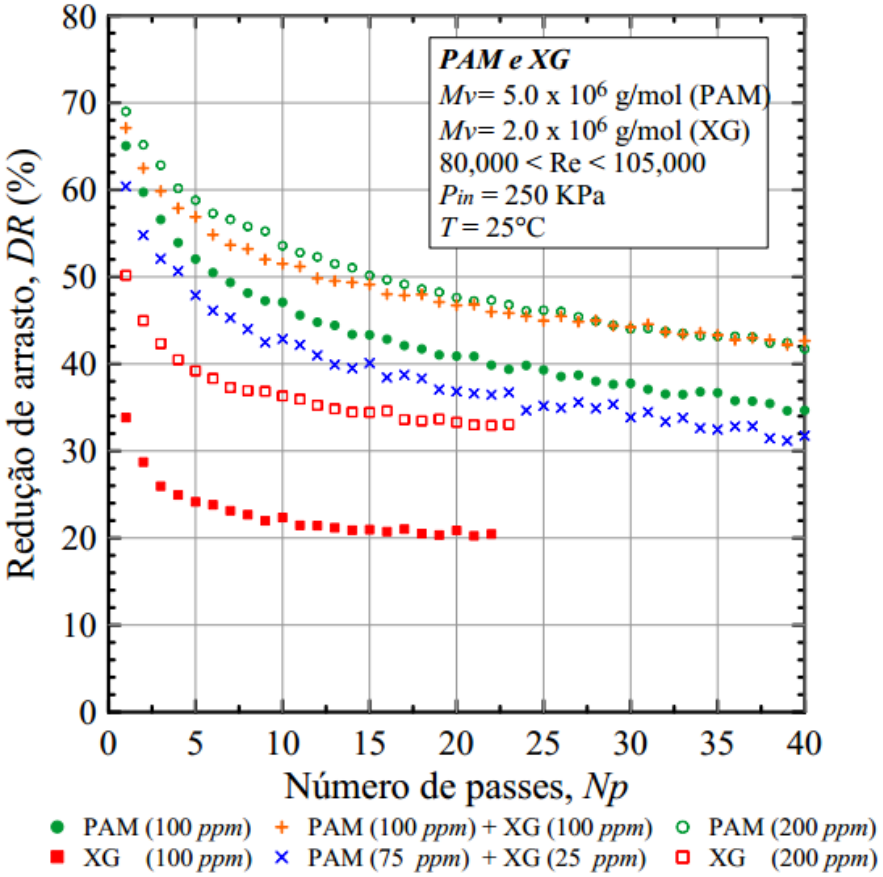


Figura 3.28 – Mistura da PAM com XG para concentrações de 100 ppm e 200 ppm.

Percebe-se que os resultados obtidos nestas concentrações não são tão eficientes como os obtidos para o PEO. Pois o resultado obtido para uma concentração de

poliacrilamida de 100 ppm (símbolo de bola cheia) é maior do que se misturando 75 ppm de PAM com 25 ppm de XG (x na Figura 3.28). O mesmo acontece para as concentrações de 200 ppm. Não há efeito aditivo. Resultados consistentes com os reportados por Reddy *e* Singh (1985). Os autores mostraram só resultados com eficiências menores para diferentes proporções de mistura. Uma hipótese que poderia estar ligado ao efeito é a formação de agregados, originado pelas forças intermoleculares entre as distintas soluções, sendo maiores para o PEO e o XG em comparação com as formadas entre o PAM e o XG, devido a que as soluções de XG (como acreditado na seção 3.2) e PEO são polímeros que estão propensos à formação de agregados, como mostrado para o PEO por Shetty e Solomon (2008). Outros autores que expõem esta ideia são: Dschagarowa e Bochossian (1978) que misturaram polisobutileno com borracha de isopreno (ambos os polímeros agentes redutores de arrasto) em tolueno como solvente. O resultado da mistura é bastante positivo e os autores argumentam que este desvio favorável é devido á presença simultânea das moléculas de dois diferentes polímeros na solução. Em outras palavras, à formação de agregados. Esta eficiência é maior quando a proporção do agente que reduz menos arrasto (borracha de isopreno) na mistura, aumenta. Ao que parece a molécula rígida é fundamental na mistura dos polímeros. Como mostrado aqui para o XG. Ideia que é também compartilhada por Dingilian e Ruckenstein (1974). Eles raciocinaram que o sinergismo da mistura na redução de arraste resulta quando pelo menos um dos componentes da mistura é uma estrutura rígida.

Steele Bayer e Loth (2014) mostram experimentalmente que diluindo a mistura de PEO com Nanotubos de Carbono-CNTs (que são varas rígidas) em água-glicerina aumenta a redução de arrasto. Um fato muito interessante, pois não há redução de arrasto quando são utilizados os nanotubos de carbono simplesmente como aditivos. Indica-se que os *CNTs* interagem com a longa cadeia de polímeros para formar grandes estruturas redutoras de arrasto. Finalmente os autores observam experimentalmente que os *CNTs* não degradam, mesmo depois de passar por uma bomba peristáltica durante 12 h. Resultado que corrobora a ideia da desaglomeração em vez de degradação para as soluções de XG (polímero rígido) com é observado nesta pesquisa.

CAPÍTULO 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comportamento da redução de arrasto em polímeros rígidos e flexíveis de alta massa molecular é estudado na presente pesquisa. Para tal fim, é utilizada uma bancada experimental que é formada por tubulações de aço termicamente isoladas, conectadas em serie. Os testes são realizados empregando-se soluções aquosas de Óxido de Polietileno (PEO), Poliacrilamida (PAM) e Goma Xantana (XG). Todas, soluções diluídas com exceção da PAM para $c = 200$ ppm. As massas moleculares e as concentrações de "*overlap*" são avaliadas por trabalhos anteriores por Pereira e Soares (2012) e Pereira, Andrade e Soares (2013). Neste estudo são utilizados exatamente esses mesmos aditivos, existentes no laboratório de Reologia da Universidade Federal do Espírito Santo. Interrogações importantes como: qual tipo da água utilizar nos experimentos (deionizada, filtrada), método e tempo de mistura das soluções e condições de estoque da amostra têm sido analisados previamente à execução dos experimentos. A correlação de Blasius para tubulações lisas é comparada com o fator de atrito experimental com o objetivo de validar a precisão dos equipamentos (ver Figura 3.1), obtendo-se uma incerteza aceitável máxima de 6%. Além disso, testes de repetitividade são feitos ganhando-se maior certeza no experimento, como mostrado na Figura 3.2. Os resultados são divididos em quatro seções. Na primeira são expostos os resultados preliminares de validação da bancada. Na segunda seção se apresentam os valores de DR absoluta, resultados que são função crescente da concentração e da massa molecular. Um reporte bastante relevante nessa parte é ilustrado na Figura 3.9 na qual os valores de redução de arrasto obtidos para o polímero rígido (XG) são bastante semelhantes, independentemente do dispositivo para impulsionar a solução. As soluções de XG mostram uma alta resistência à degradação quando são impulsionadas através de uma bomba centrífuga assim como por meio do compressor. Este efeito induz assumir que a perda de eficiência em XG está associada à desaglomeração em vez de degradação. Seguidamente é evidenciado como a redução de arrasto influencia diminuindo o fator de atrito, que na prática se reflete aumentando a vazão do

escoamento e diminuindo a queda de pressão na seção principal do teste, apesar de que uma pressão fixa é estabelecida na entrada da seção de teste. Estes valores experimentais indicam que entre os polímeros flexíveis em estudo, as soluções de PAM são mais eficientes do que as soluções de PEO, na faixa de concentrações e massas moleculares exploradas.

A degradação polimérica é também analisada em função dos números de passes da solução pela bancada Np, através da redução de arrasto relativa, DR'. Evidencia-se inicialmente que o aumento da concentração e da massa molecular causam uma menor degradação na cadeia do polímero. Constata-se que as soluções de PAM são mais resistentes à degradação quando se atinge o estado estável. Observa-se também a complexa relação que existe entre DR' e a concentração para as soluções de XG, por exemplo, uma concentração de 25 ppm assintotisa em um maior DR' do que uma de 75 ppm, indicando que a concentração menor degrada ou desaglomera menos. Resultados consistentes qualitativamente com os observados por Pereira, Andrade e Soares (2013), em uma geometria cilíndrica rotatória.

Posteriormente, se apresenta uma equação de decaimento que se ajusta à variação do coeficiente da redução de arrasto relativo com o número de passes. Está função que segue a mesma linha que a proposta por Pereira e Soares (2012) é determinada com base nas variáveis investigadas $(c, M_v, Re\ e\ T)$ para os três polímeros analisados. Nota-se que os valores de DR' obtidos com o modelo proposto se ajustam relativamente bem aos resultados experimentais apresentados (veja Figuras 3.21, 3.22 e 3.23). Ressalta-se que para determinar o $DR_{máx}$ (Equação 12) é utilizada exatamente a mesma função apresentada pelos autores referenciados, indicando assim que esta função pode ser usada independentemente da geometria utilizada.

Finalmente, na seção 3.4 é mostrada uma serie de testes misturando os diferentes polímeros PEO com XG e PAM com XG em água filtrada. Obtendo-se maior eficiência para a mistura de PEO com XG e menor para a mistura com PAM com XG. Presumivelmente, estes resultados são explicados em base a duas ideias; a primeira é um efeito aditivo apresentado no DR como pode ser observado na Figura 3.25, onde os polímeros interagem com o vórtice turbulento independentemente sem se atrapalhar. A segunda é referente à formação de agregados.

Como trabalho futuro sugere-se realizar testes na bancada experimental para analisar o efeito da variação da temperatura e do número de Reynolds na redução de arrasto. Esses resultados podem ser comparados qualitativamente com os reportados por Pereira, Andrade e Soares (2013) que estudaram a variação desses parâmetros através de um dispositivo cilíndrico rotativo. Para determinar se os polímeros estão degradando ou desaglomerando é recomendado fazer uma análise de sua estrutura molecular através de técnicas experimentais como espalhamento de luz dinâmico ou cromatografia de permeação em gel. Finalmente, devido aos resultados interessantes encontrados com a mistura de polímeros, é recomendado analisar diferentes faixas de concentrações dos aditivos, assim como determinar até que ponto o aumento da concentração do polímero rígido aumenta a eficiência da redução de arrasto. Adicionalmente, a mistura de Nanotubos de Carbono com polímeros como a Poliacrilamida e Goma Xantana pode ser bastante promissora para investigar o fenômeno do ponto de vista prático e científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Andrade, R. M. Pereira, A. S. and Soares, E. J. “Drag increase at the very start of drag reducing flows in a rotating cylindrical double gap device,” Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 212, pp. 73–79, 2014.

[2] Bewersdorff, H.W. and Berman, N.S. “The influence of flow-induced non-Newtonian fluid proprerties on turbulent drag reduction”, Rheologica Acta, vol. 27, pp. 130-136, 1988.

[3] Bewersdorff, H. W. and Singh, R. P. “Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions,” Rheologica Acta, vol. 27, pp. 617–627, 1988.

[4] 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.

[5] Brostow, W. “Drag reduction in flow - review of applications, mechanism and prediction,” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 14, pp. 409–416, 2008.

[6] 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.

[7] Choi, H. J. and Jhon, M. S. “Polymer-induced turbulent drag reduction,” Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 35, pp. 2993–2998, 1996.

[8] 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.

[9] Den Toonder, J.M.J. Draad, A. A. Kuiken, G. D. C. and Nieuwstadt. “Degradation Effects of Dilute Polymer Solutions on Turbulent Drag Reduction in Pipe Flows,” Applied Scientific Research, vol. 55, pp. 63-82, 1995.

[10] 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.

[11] Dimitropoulos, C. D. Dubief, Y. Shaqfeh, E. S. G. and Moin, P. “Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow of inhomogeneous polymer solutions,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 566, pp. 153–162, 2006.

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

[13] Dingilian, E. and Ruckenstein, E. “Positive and negative deviations from additivity in drag reduction of binary dilute polymer solutions” AIChe Journal. Vol. 20, pp. 1222-1224, 1974.

[14] Draad, A. A, Kuiken, G.D.C, and Nieuwstandt, F. T. M. “Laminar-turbulent transition in pipe flow for Newtonian and non-Newtonian fluids” J. Fluid Mech. Vol. 377, pp. 267–312, 1998.

[15] Dschagarowa, E. and Bochossian T. “Drag reduction in polymer mixtures,” Rheol. Acta, vol. 17, pp. 426-432, 1978.

[16] 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.

[17] Dujmovich, T. and Gallegos, A. “Drag reducers improve throughput, cut costs,” Offshore, vol. 65, no. 12, pp. 1–4, 2005.

[18] Elbing, B. R. Winkel, M. J. Solomon, M. J. and Ceccio, S. L. “Degradation of homogeneous polymer solutions in high shear turbulent pipe flow,” Exp Fluids, vol. 47, pp. 1033–1044, 2009.

[19] Fabula, G. “Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction,” Trans ASME J Basic Engng, pp. 93–453, 1971.

[20] 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.

[21] Flory, P. J. “Principles of Polymer Chemistry”. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1971.

[22] Forrest, F. and Grierson, G. A. “Friction losses in cast iron pipe carrying paper stock,” Paper Trade Journal, vol. 92, no. 22, pp. 39–41, 1931.

[23] Hershey, H. C. and Zakin, J. L. “A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions,” Chemical Engineering Science, vol. 22, pp. 184–187, 1967.

[24] Horn, F. and Merrill, E. W .“Midpoint scission of macromolecules in dilute solution,” Nature, vol. 312, pp. 140–141, 1984.

[25] Jaafar, J. Escudier, M. P. and Poole, R. J. “Turbulent pipe flow of a drag-reducing rigid rod-like polymer solution,” Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 161, pp. 86–93, 2009.

[26] Joseph, D. D. “Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids,” New York: Springer Verlag, 1990.

[27] Kalashnikov, V. N. “Dynamical similarity and dimensionless relations for turbulent drag reduction by polymer additives,” Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, vol. 75, pp. 209–230, 1998.

[28] Kameneva, M. V. Wu, Z. J. Uraysh, A. Repko, B. Litwak, K.N Billiar, T.R. Fink, M.P. Simmons, R.L. “Blood soluble drag-reducing polymers prevent lethality from hemorrhagic shock in acute animal experiments,” Biorheology, vol. 41, no. 1, pp. 53–64, 2004.

[29] Kenis, P. R. “Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers,” Journal of Applied Polymer Science, vol. 15, p. 607, 1971.

[30] L’vov, V. S. Pomyalov, A. Procaccia, I. and Tiberkevich, V. “Drag reduction by polymers in wall bounded turbulence,” Physical Review Letters, vol. 92, pp. 244503–1–244503–4, 2004.

[31] Lumley, J. L. “Drag reduction by additives,” Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 11, pp. 367–384, 1969.

[32] 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.

[33] 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.

[34] Mostardi, R. A. Thomas, L. C. Greene, H. L. VanEssen, F. and Nokes, R. F “Suppression of atherosclerosis in rabbits using drag reducing polymers,” Biorheology, vol. 15, no. 1, pp. 1–14, 1978.

[35] Motier J. F. and Carreir, A. M. “Recent studies on polymer drag reduction in commercial pipelines,” in Drag Reduction in Fluid Flows: Techniques for Friction Control, R. Sellin and R. Moses, Eds., pp. 197–204, Ellis Horwood, West Sussex, UK, 1989.

[36] Moussa, T. and Tiu, C. “Factors afecting polymer degradation in turbulent pipe flow,” Chemical Engineering Science, vol. 49, pp. 1681–1692, 1994.

[37] Mysels, K. J. “Flow of thickened fluid,” US Patent 2 492, 173, December 27, 1949.

[38] Nadolink, R. H. “Friction reduction in dilute polystyrene solutions”. University of California, San Diego: PhD thesis, 1987.

[39] Nieuwstandt, T. M. and Den Toonder J. M. “Drag reduction by additives: A review”. Turbulence structure and Modulation, pp. 269 – 316, NY, 2001.

[40] Nijs, L. “New generation drag reducer,” in Proceedings of the 2nd International Pipeline Technology Conference, Elsevier, Ostend, Belgium, 1995.

[41] Paschkewitz, J. S. Dubief, Y. and Shaqfeh E. S. G. “The dynamic mechanism for turbulent drag reduction using rigid fibers based on lagrangian conditional statistics,” Physics of Fluids, vol. 17, pp. 1–18, 2005.

[42] 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, 1969.

[43] 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.

[44] 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.

[45] Pereira, A. S. Andrade, R. M. and Soares, E. J. “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, vol. 202, pp. 72–87, 2013.

[46] 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.

[47] Reedy, G. V. and Singh R. P. “Drag reduction effectiveness and shear stability of polymer-polymer and polymer-fibre mixtures in recirculatory turbulent flow of water” Rheo. Acta, vol. 24, pp. 296-311, 1985.

[48] Savins, J. G. “Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow,” Society of Petroleum Engineers Journal, vol. 4, pp. 203, 1964.

[49] Shetty, A. M. ans Solomon, M. J. “Aggregation in dilute solutions of high molar mass poly(ethylene) oxide and its effect on polymer turbulent drag reduction” Polymer, vol. 50, pp. 261–270, 2008.

[50] Singh, R. P. Singh,J. Deshmukh, S. R. and Kumar, A. “The effect of grafted and ungrafted guar gum on turbulent flow of water and on hydraulic conductivity of soil,” in Proceedings of the IUTAM Symposium on the Influence of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields, pp. 131–139, 1985.

[51] 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.

[52] Steele, A. Bayer, I. S. and Loth, E. “Pipe flow drag reduction effects from carbon nanotube additives,” Carbon, vol. 77, pp. 1183-1186, 2014.

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

[54] 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.

[55] Unthank, J. L. S. G. Lalka, S. G. Nixon, J. C. and Sawchuk, A. P. “Improvement of flow through arterial stenoses by drag reducing agents,” Journal of Surgical Research, vol. 53, no. 6, pp. 625–630, 1992.

[56] Vanapalli, S. A. Ceccio, S. L. and Solomon, M. J. “Universal scaling for polymer chain scission in turbulence,” Proc Natl Acad Sci, vol. 103, pp. 16660–16665, 2006.

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

[58] Virk, P. S. “Drag reduction fundamentals,” AIChE Journal, vol. 21, pp. 625–656, 1975.

[59] Virk, P. S. Mickley, H. S. and Smith, K. A. “The toms phenomenom: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions,” Journal of Fluid Mechanics, vol. 22, pp. 22–30, 1967.

[60] Virk, P. S. Mickley, H. S. and Smith, K. A. “The ultimate asymptote and mean flow structure in toms’ phenomenon,” ASME-Journal of Applied Mechanics, vol. 37, pp. 488–493, 1970.

[61] Virk, P.S. Sherman D.C. and Wagger, D.L. Additive equivalence during turbulent drag reduction, AIChE Journal, vol. 43, pp. 3257-3259, 1997.

[62] Wang, Y. Yu, B. Zakin, J.L. and Shi, H. "Review on Drag Reduction and Its Heat Transfer by Additives" Advances in Mechanical Engineering, 2011.

[63] 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.

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

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

ANEXOS

Anexo A. Especificações técnicas dos equipamentos que compõem a bancada experimental.

Inversor de frequência:

Fabricante: Weg;

Modelo: CFW 08;

Faixa de potência: $0{,}25\ a\ 20\ \mathrm{CV}$;

Resolução de frequência: $0.01\ \mathrm{Hz}$ para frequências até $100\ \mathrm{Hz}\ e\ 0.1\ \mathrm{Hz}$ para frequências maiores que $99.99\ \mathrm{Hz}$;

Quatro entradas digitais, uma entrada analógica e uma saída a relé (contato reversivo).

Medidor de vazão magnético:

Fabricante: Emerson Progress Management;

Modelo: Rosemount 8732;

Faixa de medição: $0{,}01\ a\ 12\ \mathrm{m/s}$;

Condutividade mínima do fluido: $5\ \mathrm{microsiemens/cm}$;

Temperatura de operação: $-50\ a\ 74\ °\mathrm{C}$;

Damping: ajustável entre $0\ e\ 256\ \mathrm{s}$;

Precisão: $0{,}5\%$ da taxa.

Bomba

Fabricante: Dancor;

Modelo: CAM-W6C tipo centrífuga;

Rotação máxima: $3450\ \mathrm{rpm}$;

$1{,}5\ \mathrm{CV}$ de potência elétrica;

Rotor de $145\ \mathrm{mm}$;

Tensão de alimentação de $220\ \mathrm{V}$ com motor trifásico.

Transmissores de pressão:

Fabricante: Warme;

Modelo: $WTP - 4010$;

Sensor piezo-resistivo;

Faixa de indicação: $0\ a\ 5\ \mathrm{bar}\ (4\ a\ 20\ \mathrm{mA})$;

Faixa calibrada: $0\ a\ 5\ \mathrm{bar}\ (4\ a\ 20\ \mathrm{mA})$;

Aplicação: monitoramento de pressão estática;

Fluido: Água, água do mar;

Faixa de Temperatura: $10 - 90\ ºC$;

Ajuste interno: Zero/Span;

Rosca: ¼” BSP;

Fornecidos com certificado de calibração RBC – Inmetro.

Placas de aquisição de dados:

Fabricante: National Instruments;

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

- 4 canais de 80 milivolts;
- Resolução: 24 Bits;
- Amostragem de 14 amostras/s;
- Rack com conexão USB CDAQ-$9171\ (PN\ 195724C - 01\mathrm{L})$.

Modelo 2: módulo de aquisição de dados NI USB-$6008\ (PN\ 191039D - 02\mathrm{L})$;

- Resolução: 12 Bits;
- Amostragem de sinais: 10000 amostras/s;
- Cabo USB $(PN\ 192256A - 01)$.

Termopares:

Fabricante: Iope;

Tipo: J (ferro/cobre-níquel);

Faixa de utilização: $-40\ a\ 750°\mathrm{C}$;

Adequados para uso no vácuo, em atmosferas oxidantes, redutoras e inertes.

Dois termopares no vaso de pressão, um no início e um no final da seção de teste.

Resistências térmicas:

Fabricante: SMS Resistências Elétricas;

Duas resistências tubulares de imersão;

Três tubos de cobre de $9\ \mathrm{mm}$ de diâmetro cada;

Comprimento: $50\ \mathrm{mm}$;

Potência: $7\ \mathrm{KW}$;

Alimentação: $220\mathrm{V}$, trifásica;

Capacidade de aquecimento: 420 L de água destilada a $50\ ºC$ em uma hora;

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

Compressor:

Fabricante: Shulz;

Modelo: MSV $12/175$ tipo odontológico;

Unidade compressora de único estágio;

Volume do reservatório de $178\ \mathrm{L}$;

Deslocamento de ar teórico de $340\ \mathrm{L/min}$;

Pressão de trabalho entre $5{,}5\ e\ 8{,}3\ \mathrm{bar}$.

Motor de $2\ x\ 1\ \mathrm{HP}$;

Tensão de alimentação de $220\ \mathrm{V}$, monofásico.

Vaso de pressão:

Fabricante: Engetank;

Capacidade volumétrica: 350 L;

Paredes em chapa de aço $SA-36$ com $4{,}75\ \mathrm{mm}$ de espessura;

Pressão máxima de trabalho admitida: $8{,}70\ \mathrm{kgf/cm^2}$;

Porta oblonga de inspeção de $230\ x\ 300\ \mathrm{mm}$;

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

Pintura azul (referente ao ar comprimido);

APÊNDICE

APÊNDICE A. Exemplo de rejeição de dados duvidosos através do critério de Chauvenet, aplicado nesta pesquisa.

Os dados apresentados na tabela anexa são aquisitados através da plataforma de *LabView* para um teste feito com água sem aditivo. Os principais parâmetros medidos são: vazão, pressão e temperatura. Neste exercício a análises é feita só para a vazão. A quantidade de dados medidos depende do tempo que despende o fluxo turbulento em passar pelas tubulações da bancada, que pode diminuir com o aumento da massa molecular, concentração e tipo de polímero. Depois de aquisitados os dados, são tabulados (valores originais) para determinar à média e o desvio padrão, mediante as equações;

$$x_m = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{S-1}\sum (x_i - x_m)^2\right]^{1/2}$$

É calculado o desvio individual e este dividido pelo desvio padrão, que são calculados através das seguintes equações;

$$d_i = x_i - x_m$$

$$\Delta R = \frac{d_i}{\sigma}$$

Compara-se cada um desses valores obtidos com o máximo desvio aceitável sobre o desvio padrão, que pode ser tomado da referência na Tabela 2.2 que neste casso é; $2{,}57$ (para $n = 50$). Todo valor maior a esse número e rejeitado, (mostrados de

color vermelho na tabela anexa). Um novo valor médio e desvio padrão são calculados com os dados restantes (valores expurgados), sendo desta forma;

$$v \pm \Delta v = 3{,}308 \pm 0{,}072$$

Que é o valor da vazão da água sem aditivo calculado nesta pesquisa a pressão de 250 KPa. Desta mesma forma é feito a análises estatístico para os demais dados aquisitados nesta pesquisa. Observe-se que neste exercício o valor médio da vazão e o desvio padrão não mudaram significativamente, isso devido principalmente à pequena incerteza do instrumento de medição. Há alguns outros casos onde os dados rejeitados são maiores, especialmente quando são utilizadas massas moleculares e concentrações que aumentem a turbulência do fluxo, mesmo assim, o desvio padrão é consideravelmente baixo.

Amostra	Valores Originais x_i	Critério de Chauvenet ΔR	Valores Rejeitados
1	3.73376	**3.17**	
2	3.69022	**2.84**	
3	3.38761	0.49	3.38761
4	3.34376	0.15	3.34376
5	3.33396	0.08	3.33396
6	3.33398	0.08	3.33398
7	3.33376	0.08	3.33376
8	3.33376	0.08	3.33376
11	3.33376	0.08	3.33376
12	3.33376	0.08	3.33376
13	3.32376	0.00	3.32376
22	3.32376	0.00	3.32376
23	3.33376	0.08	3.33376
24	3.32376	0.00	3.32376
25	3.32376	0.00	3.32376
26	3.32376	0.00	3.32376
27	3.31376	-0.08	3.31376
28	3.31376	-0.08	3.31376
29	3.32376	0.00	3.32376
30	3.32376	0.00	3.32376
31	3.32376	0.00	3.32376
32	3.32376	0.00	3.32376
33	3.32376	0.00	3.32376
34	3.32376	0.00	3.32376
35	3.32376	0.00	3.32376
36	3.32376	0.00	3.32376
37	3.32376	0.00	3.32376
38	3.32376	0.00	3.32376
39	3.32379	0.00	3.32379
40	3.32376	0.00	3.32376
41	3.01376	-2.40	3.01376
42	2.99714	-2.53	2.99714
43	2.88759	**-3.38**	
Média, x_m	3.3238		3.3082
Desvio P, σ	0.129		0.072