

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

**EDUARDO CALEGARIO COELHO**

**ESTUDO DE MUCILAGEM E FIBRA NATURAIS (QUIABO) COMO REDUTORES  
DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS.**

VITÓRIA

2016

**EDUARDO CALEGARIO COELHO**

**ESTUDO DE MUCILAGEM E FIBRA NATURAIS (QUIABO) COMO REDUTORES  
DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS.**

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. Renato do Nascimento Siqueira

Coorientador: Prof. Dr. Edson José Soares

VITÓRIA

2016

**EDUARDO CALEGARIO COELHO**

**ESTUDO DE MUCILAGEM E FIBRA NATURAIS (QUIABO) COMO REDUTORES  
DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS COM ALTOS NÚMEROS DE REYNOLDS.**

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 04 de Novembro de 2016.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira - Orientador**  
**Instituto Federal do Espírito Santo**

---

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

---

**Prof. Dr. Daniel Onofre de Almeida Cruz - Examinador externo**  
**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e por iluminar meu caminho, provendo-me a sabedoria necessária para seguir em frente.

Agradeço à minha família e namorada por todo o amor e confiança, em especial meus pais, Maria da Penha Calegario e José Luzanir Coelho que sempre me incentivaram, auxiliaram e torceram pelo meu sucesso.

Agradeço ao professor Renato do Nascimento Siqueira por sua orientação, com total disponibilidade e respeito, compartilhando suas experiências e conhecimentos, sempre disponível a colaborar com meu desenvolvimento e com a realização deste projeto.

Agradeço ao professor Edson José Soares por sua orientação e sabedoria oferecidas durante todo meu período acadêmico, sendo fundamental para a elaboração e sucesso deste trabalho. Agradeço também, toda sua disponibilidade e incentivo.

Agradeço aos professores Rogério Ramos e José Joaquim Santos por toda colaboração e conhecimento oferecido para minha formação.

Agradeço aos amigos e colegas de mestrado, Renata Travellin, Alan Modolo e Gabriel Vargas pelo companheirismo. Agradeço em especial ao Kelvin Cristien de Oliveira Barbosa por todo seu esforço, dedicação e apoio na execução desta pesquisa. Desejo a todos, grande sucesso em suas vidas.

Agradeço à Andréia Eyng, funcionária da secretaria do programa de pós-graduação, pela atenção e gentileza.

Agradeço ao Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte da Faculdade do Centro Leste (UCL), e seus representantes, Lucas Antônio Silveira Silva e Michel Luiz Costalonga, pelo suporte prestado a esta pesquisa.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo auxílio financeiro.

## RESUMO

Redução de arrasto por injeção de polímeros de alto peso molecular em escoamentos turbulentos é um importante fenômeno que tem sido extensivamente estudado por muitos pesquisadores desde que foi relatado por Toms (1948). A aplicação desse fenômeno representa um grande benefício para muitos processos industriais. Porém, a maioria dos polímeros normalmente utilizados como agentes redutores de arrasto são sintéticos, os quais apresentam baixa resistência perante as forças turbulentas do escoamento e geralmente são tóxicos ao ser humano. Esses fatos encorajam os pesquisadores a buscarem polímeros naturais, mais suscetíveis a biodegradação e mais resistentes, para substituir os artificiais. Neste trabalho, é investigado a eficiência de redução de arrasto de soluções aquosas da mistura de polímeros e fibras de quiabo. Para tal, é utilizado um aparato experimental composto de um sistema de tubulações em série, em que a seção principal de teste é feita de aço inoxidável com um tratamento interno de brunimento. Esse aparato possui um medidor de fluxo magnético e três transdutores de pressão para a aquisição dos dados experimentais e o escoamento é impulsionado por uma bomba centrífuga com rotação fixa. Para a obtenção do material de teste deste trabalho, uma metodologia de processamento da fruta, inicialmente em seu estado íntegro, é desenvolvido. Os resultados são focados na análise da capacidade de redução de arrasto do material em diferentes concentrações. Análises como, queda de pressão e ganho de vazão, também são realizadas, com o objetivo de se avaliar a eficiência das soluções perante a degradação. Uma análise, na qual são reorganizados os valores de  $DR$  absoluto, é feita e apresentada como função da redução de arrasto relativa,  $DR'$ . Por se tratar de um polímero natural, o qual é fortemente suscetível à degradação biológica, um teste avaliando o efeito dessa degradação sob a capacidade de redução de arrasto da solução também é realizado. Como se trata de um novo agente redutor, o material foi comparado, em função da capacidade de redução de arrasto, com outros dois materiais já difundidos e largamente utilizados: a Goma Xantana, um polissacarídeo natural e rígido, e o Óxido de Polietileno, um polímero sintético e flexível. Por fim, são preparadas e testadas misturas de fibras e polímeros de quiabo com óxido de polietileno, mostrando interessantes efeitos sinérgicos. Os resultados confirmam a

eficiência e aplicabilidade dos polímeros e fibras do quiabo como bons agentes redutores de arrasto.



## ABSTRACT

Drag reduction by injection of high molecular weight polymers into a turbulent flow is an important phenomenon that has been extensively studied by many researchers since it was reported by Toms (1948). The application of this phenomenon represents a great benefit for many industrial processes. However, most polymers commonly used as drag reducing agents are synthetic, have low resistance against the turbulent flow forces and are generally toxic to humans. These facts encourage researchers on the search of natural, more biodegradable and more resistant polymers to replace the artificial ones. In the present work, the drag reduction efficiency of dilute aqueous solutions of a mixture of fibers and polymers extracted from okra pods is investigated. For such investigation, it is used an experimental apparatus, consisting of a system of pipes in series, in which the main section of the test is made of stainless steel with an internal burnishing treatment. This apparatus has a magnetic flow meter and three pressure transducers for acquisition of experimental data and a centrifugal pump, with fixed rotation, promotes the flow. To obtain the test material in this work, a processing methodology for the fruit, which is initially in its natural state, is developed. The results are focused on the analysis of the drag reduction capability of the material at different concentrations. Analyses such as pressure drop and flow increase are also performed, in order to evaluate the efficiency of the solution to degradation. An analysis, in which the absolute  $DR$  values are reorganized, is made and presented as relative drag reduction,  $DR'$ . Considering the fact that it is a natural polymer, which is highly susceptible to biological degradation, a test to evaluate the effect of degradation in the drag reduction capability of the solution is also realized. Since this is a new reduction agent being studied, the material was compared, based on drag reduction capability, with two other materials already widely used, which are, Xanthan Gum, a natural and rigid polysaccharide, and Polyethylene Oxide, a synthetic flexible polymer. Finally, solutions of mixtures of okra fibers and polymers and Polyethylene Oxide are made and tested, which exhibit interesting results associated with synergetic effects. The results confirm the efficiency and applicability of okra polymers and fibers as good drag reduction agents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Interação do polímero estático com os vórtices próximo à parede. Dubief <i>et al.</i> (2004) .....	22
Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008) .....	24
Figura 1.3 – Processo de cisão molecular. Soares <i>et al.</i> (2015) .....	25
Figura 1.4 – Processo de desagregação molecular. Soares <i>et al.</i> (2015).....	27
Figura 2.1 – Reômetro Haake Mars II. ....	33
Figura 2.2 – Etapas de processamento do quiabo.....	35
Figura 2.3 – Desenho esquemático da bancada experimental.....	36
Figura 2.4 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução. Pereira Andrade e Soares (2013).....	41
Figura 2.5 – Espectro de ressonância magnética do pó de quiabo.....	44
Figura 2.6 – Parte de uma macromolécula de amido. Solomons e Fryhle (2006).....	44
Figura 2.7 – Parte de uma macromolécula de proteína. Solomons e Fryhle (2006) .	45
Figura 2.8 – Variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento.....	46
Figura 3.1 – Teste de validação da bancada experimental. ....	50
Figura 3.2 – Teste de repetitividade.....	52
Figura 3.3 – Análise do tempo de diluição. ....	53
Figura 3.4 – Efeito da concentração na redução de arrasto em função do número de passes.....	55
Figura 3.5 – Efeito da concentração na redução de arrasto máxima e assintótica. ..	57

Figura 3.6 – Vazão em função do número de passes para diferentes concentrações. ....	58
Figura 3.7 – Queda de pressão em função do número de passes para diferentes concentrações. ....	60
Figura 3.8 – Degradação da solução de quiabo em função do número de passes para diferentes concentrações. ....	61
Figura 3.9 – Efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto. ....	63
Figura 3.10 – Comparação entre soluções com e sem fibras. ....	64
Figura 3.11 – Comparação entre quiabo e Goma Xantana em relação à capacidade de redução de arrasto. ....	66
Figura 3.12 – Comparação entre quiabo e PEO em relação a capacidade de redução de arrasto. ....	67
Figura 3.13 – Mistura de Quiabo e PEO em concentração de 200 ppm. ....	69
Figura 3.14 – Mistura de Quiabo e PEO em concentração de 400 ppm. ....	70

## LISTA DE SÍMBOLOS

PAM	Poliacrilamida
PEO	Óxido de Polietileno
XG	Goma Xantana
MDR	máxima redução de arrasto
DRA	agente redutor de arrasto
MAS	rotação em torno do ângulo mágico
CP	polarização cruzada
$a_{dg}$	distância do rotor ao fundo do copo (m)
$c$	concentração polimérica (ppm)
$D_R$	razão de arrasto – $D_R = \Delta p / \Delta p_0$ (-)
$DR$	coeficiente de redução de arrasto – $DR = 1 - f/f_0$ (-)
$\%DR$	coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
$DR_{m\acute{a}x}$	valor máximo do coeficiente de redução de arrasto (%)
$DR_{assint}$	valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto (%)
$DR'$	coeficiente da redução de arrasto relativa – $DR' = DR(t)/DR_{m\acute{a}x}$ (-)
$D$	diâmetro da tubulação (m)
$f$	fator de atrito de Darcy da solução (-)
$f_0$	fator de atrito de Darcy do solvente (-)
$f_D$	fator de atrito de Darcy (-)

$f_{Virk}$	fator de atrito de Virk (-)
$f_{Blasius}$	fator de atrito de Blasius (-)
$K$	fator geométrico (-)
$L_0$	comprimento do rotor (m)
$l$	comprimento da seção de teste (m)
$\bar{u}$	velocidade média do escoamento (m/s)
$M_v$	massa molecular média (g/mol)
$Np$	número de passes da solução pela bancada experimental (un.)
$Q$	vazão do escoamento (m <sup>3</sup> /h)
$R_1$	raio interno do copo – geometria <i>Double Gap</i> (m)
$R_2$	raio interno do rotor – geometria <i>Double Gap</i> (m)
$R_3$	raio externo do rotor – geometria <i>Double Gap</i> (m)
$R_4$	raio externo do copo – geometria <i>Double Gap</i> (m)
$Re$	número de Reynolds – $Re = \rho \bar{u} d / \eta$ (-)
$t_r$	Tempo de resistência (s)
$t$	Tempo (s)
$\dot{\gamma}$	taxa de deformação média (1/s)
$\delta$	razão entre os raios da geometria (-)
$\eta$	viscosidade dinâmica da solução (Pa.s)
$\eta_\infty$	viscosidade em altas taxas de deformação (Pa.s)
$\rho$	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )

$\tau$	tensão de cisalhamento nominal (Pa)
$\sigma$	desvio padrão (-)
$d_{m\acute{a}x}$	desvio máximo aceitável (-)
$N$	número de valores da amostra (un.)
$n$	número de moléculas (un.)
$T_{dg}$	torque na geometria <i>Double Gap</i> (N.m)
$\omega$	velocidade angular do rotor (rad/s)
$\Delta P$	queda de pressão da solução (Pa)
$\Delta P_o$	queda de pressão do solvente (Pa)

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Massas obtidas por pesagem e respectivas concentrações. ....	40
Tabela 2.2 – Critério de Chauvenet.....	47

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>XVI</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1 Motivação.....	18
1.2 Revisão da literatura .....	20
1.3 Caracterização do problema.....	31
<b>CAPÍTULO 2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL</b> .....	<b>32</b>
2.1 Equipamentos .....	32
2.1.1 Bancada experimental .....	32
2.1.2 Reômetro .....	33
2.1.3 Balanças .....	33
2.2 Produção do material de teste .....	34
2.3 Descrição dos testes no aparato experimental .....	35
2.3.1 Procedimento para estimativa do tempo de diluição.....	38
2.3.2 Procedimento para análise do efeito da variação de concentração.....	38
2.3.3 Testes de degradação biológica .....	38
2.3.4 Testes para análise do efeito da fibra .....	39
2.3.5 Medição da viscosidade.....	40



2.4	Caracterização do material e da solução .....	42
2.5	Critério estatístico para rejeição dos dados .....	46
<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS .....</b>		<b>49</b>
3.1	Resultados preliminares.....	49
3.1.1	Validação da bancada .....	49
3.1.2	Tempo de diluição.....	52
3.2	Influências da concentração na redução de arrasto absoluta.....	54
3.2.1	Comportamento da vazão e queda de pressão através da seção de teste .....	57
3.3	Redução de arrasto relativa .....	61
3.4	Efeitos da degradação biológica .....	62
3.5	Efeitos da fibra .....	64
3.6	Comparação entre quiabo, Goma Xantana (XG) e Óxido de Polietileno (PEO) .....	65
3.7	Mistura de polímeros .....	68
<b>CAPÍTULO 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>		<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>74</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

A maioria dos escoamentos encontrados na prática são turbulentos e tem como característica a alta perda de energia decorrente da dissipação dos vórtices turbulentos. A utilização de pequenas quantidades de aditivos em um escoamento em regime turbulento é capaz de provocar grande redução dessa perda de energia. Diversos aditivos são capazes de proporcionar esse efeito, fenômeno conhecido como redução de arrasto. Dentre os materiais mais conhecidos e utilizados se destacam os aditivos poliméricos, surfactantes, fibras e bolhas de gás. Esse fenômeno foi inicialmente observado por Forrest and Grierson (1931), porém, na época, tal observação não obteve devida atenção. Tom (1948) foi o primeiro pesquisador a reportar cientificamente o fenômeno. Devido ao sucesso da técnica e ao grande potencial de aplicação prática em diversas áreas, como em muitos processos industriais (transporte de líquidos por exemplo) e também em aplicações médicas, tal fenômeno despertou a atenção de muitos pesquisadores e, desde de então, vem sendo muito estudado.

Atualmente, a técnica de redução de arrasto por adição de aditivos ao escoamento é largamente utilizada em diversos processos industriais. Uma das aplicações mais citadas dessa técnica, devido ao grande porte, pode ser atribuída ao transporte de óleo bruto no sistema de dutos conhecido como "*Trans-Alasca Pipe Line*". Esse oleoduto possui uma extensão de aproximadamente 1300 km por onde o óleo é transportado, além de 12 estações de bombeamento. De acordo com Burger e Chorn

(1980), pequena quantidade de aditivos poliméricos solúveis em óleo, poliolefinas, são injetadas em cada estação de bombeamento com o objetivo de aumentar a vazão, mantendo-se fixa a perda de pressão, resultando assim em um ganho de aproximadamente 30% na produção. Além dessa, existem inúmeras outras aplicações nas quais utilizam-se com sucesso a redução de arrasto por injeção de aditivos, sendo empregado nos mais diversos processos, como: no aumento da velocidade de embarcações (Larson, 2003), cujo objetivo do aditivo é diminuir o atrito entre o casco do navio e a água; no combate ao incêndio (Fabula, 1971; Figueredo e Sabadini 2003), que utiliza polímeros com a intenção de aumentar o alcance dos jatos de água; e em sistemas de irrigação (Singh *et al.*, 1985), promovendo economia de energia no processo ou aumento da capacidade do sistema. A biomedicina também é uma área de bastante interesse para a utilização desses aditivos, sendo estudado para o controle do choque hemorrágico (Kameneva *et al.*, 2004), no combate ao derrame e ataque cardíaco causado por aterosclerose (Mostardi *et al.*, 1978; Unthank *et al.*, 1992 e Chen *et al.*, 2011). Contudo, a maioria dos polímeros normalmente utilizados como agentes redutores de arrasto atualmente são polímeros sintéticos, os quais possuem pouca resistência contra as forças de cisalhamento turbulentas e apresentam caráter tóxico. Dessa forma, devido a toxicidade, esses polímeros sintéticos não podem ser aplicados com segurança em algumas importantes áreas, como em áreas da medicina ou que envolvam contato com o meio ambiente. Esse fato tem encorajado muitos pesquisadores a investigar novos polímeros naturais, facilmente biodegradáveis, mais resistentes e capazes de proporcionar satisfatória redução de arrasto com o propósito de substituir os atuais artificiais.

Poucos são os polímeros naturais atualmente utilizados como agente redutor de arrasto. Porém, sabe-se que muitos materiais disponíveis na natureza são capazes proporcionar tal efeito, como a casca da banana processada, a nata de coco em suspensão e as mucilagens<sup>1</sup> de babosa e quiabo. Apesar desses materiais provocarem redução de arrasto, seus comportamentos perante ao efeito de redução carecem de informação, pois ainda são poucos os estudos relacionados a eles.

O objetivo do presente trabalho é analisar o fenômeno de redução de arrasto em dutos através de método experimental em escoamentos turbulentos de uma solução aquosa

---

<sup>1</sup> Solução aquosa que contém proteínas e polissacarídeos presente em quase todos os vegetais.

com mistura de polímeros e fibras extraídos do quiabo. É realizado um estudo sobre a capacidade de redução de arrasto desse material e como ela varia com o aumento da concentração, assim como suas características de resistência, perante as tensões cisalhantes do escoamento. Também são avaliados os efeitos da biodegradação na capacidade de redução de arrasto e os efeitos sinérgicos com a mistura do polímero flexível óxido de polietileno.

## 1.2 Revisão da literatura

Forrest e Grierson (1931) foram os primeiros a observar o fenômeno de redução de arrasto. Os autores aplicaram fibra de polpa de madeira em água e observaram que essa mistura diminuía a energia necessária para a realização do escoamento. Porém, na época, o fenômeno não recebeu a devida importância. Finalmente, Toms (1948) observou que soluções poliméricas de baixa concentração, utilizando polímeros de alto peso molecular, eram capazes de reduzir drasticamente o atrito no escoamento. O autor percebeu ainda que esse efeito está associado a escoamentos turbulentos e que mantendo-se a perda de carga constante, a aditivação poderia aumentar significativamente a vazão do escoamento. Seu trabalho foi pioneiro sobre o fenômeno de redução de arrasto pela adição de polímeros, posteriormente chamado de “*Toms effect*” por muitos autores. Savins (1964), levando em consideração escoamentos em tubos, introduz o termo “redução de arrasto” e o relaciona com a razão entre a queda de pressão observada para a solução com agente redutor e a queda de pressão observada para o solvente, ambos medidos em mesma vazão e comprimento de tubulação, originando a seguinte equação:

$$D_R = \frac{\Delta P}{\Delta P_0}. \quad (1)$$

Onde  $\Delta P$  é  $\Delta P_0$  são as quedas de pressão ocorridas no escoamento da solução e do solvente, respectivamente. Dessa forma, o autor afirma que qualquer solução em que a razão de arrasto seja inferior a 1 é uma solução redutora de arrasto. O termo “redução de arrasto” é definido pelo autor em termos percentuais como:

$$\%DR = (1 - D_R) \times 100. \quad (2)$$

Lumley (1969) restringe a definição de redução de arrasto em função do fator de atrito. Para o autor, considera-se como redução de arrasto, a redução do fator de atrito da solução redutora de arrasto, em comparação com o fator de atrito do solvente, ambos em um mesmo número de Reynolds. A definição de Lumley é largamente utilizada, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\%DR = \frac{(f - f_0)}{f} \times 100. \quad (3)$$

Onde  $f$  e  $f_0$  representam, respectivamente, o fator de atrito da solução aditivada e do solvente.

O mecanismo por trás do fenômeno de redução de arrasto divide opiniões entre os pesquisadores e é um fato que ainda não pôde ser explicado com total clareza. Dentre as teorias estabelecidas para explicar o fenômeno existem duas que se destacam e são as mais aceitas e seguidas pelos pesquisadores. A primeira, proposta por Lumley (1973), baseia-se nos efeitos viscosos. Lumley propõe que um aumento da viscosidade extensional do fluido é provocado no escoamento pelo estiramento das moléculas poliméricas em certa escala turbulenta. É argumentado que o aumento da viscosidade extensional fora da subcamada viscosa é capaz de suprimir flutuações turbulentas, o que provocaria o aumento da espessura da camada de transição e ocasionaria diminuição da perda de energia do escoamento. A segunda classe de teoria, proposta por Tabor e De Gennes (1986) é conhecida como teoria elástica. Os autores sugerem que o polímero atua somente nas pequenas escalas da turbulência, onde a energia elástica acumulada pelo estiramento do polímero é responsável pela redução de arrasto no momento em que essa energia se equipara à energia cinética turbulenta presente na camada de transição. Dessa forma, é interrompido previamente a cascata de Kolmogorov, impedindo a dissipação da energia em escalas menores de turbulência.

Uma teoria recente para o fenômeno é proposta por Dubief *et al.* (2004). Os autores utilizam simulações numéricas em um canal para descrever a interação entre as moléculas poliméricas flexíveis e o escoamento turbulento. Na teoria proposta, os autores consideram que as moléculas trabalham de forma cíclica e organizada, acumulando energia dos vórtices e cedendo-a para o escoamento principal. Esse processo é ilustrado na Figura 1.1, onde a parâmetro  $E$  é o “trabalho do polímero” e computa a energia acumulada pelos polímeros durante o escoamento, onde os subscrito  $x$  refere-se a direção do escoamento principal e  $\alpha$  a qualquer direção. O acúmulo de energia, na forma elástica, ocorre na região da subcamada de transição (posição  $y^+ = 5$ , onde  $y^+$  é a distância adimensional normal à parede), onde as moléculas, inicialmente encolhidas, são estiradas por interação com os vórtices e escoamento médio dessa região ( $E_\alpha < 0$ ). Após armazenar energia, a molécula é então compelida para a subcamada viscosa, onde encolhe novamente e, nesse processo, cede a energia acumulada para o escoamento principal ( $E_x > 0$ ). Esse efeito cíclico ocorre indefinidas vezes durante o escoamento, reduzindo as perdas de energia.

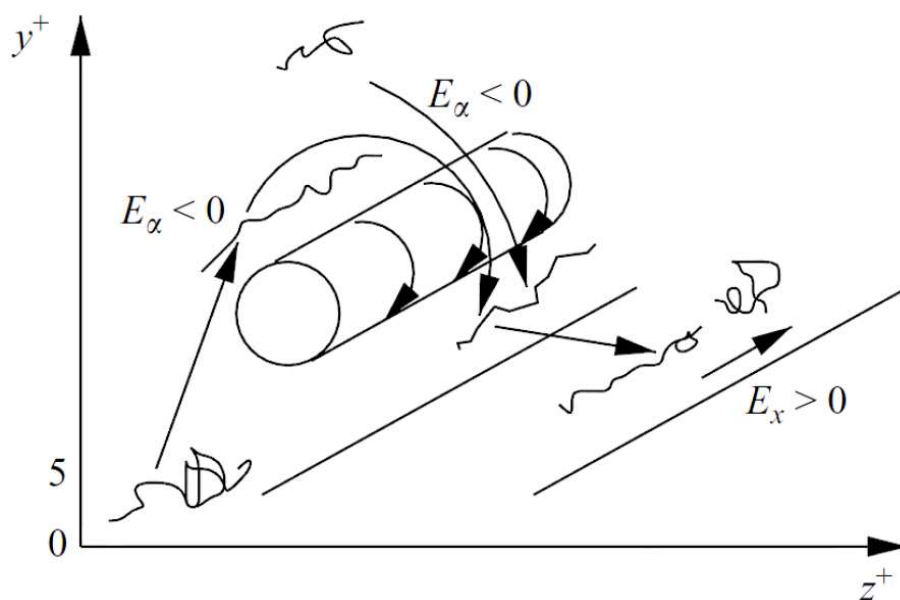


Figura 1.1 – Interação do polímero estático com os vórtices próximo à parede. Dubief *et al.* (2004)

Além das teorias que envolvem a causa da redução, vários outros comportamentos referentes ao fenômeno já foram observados. Um importante aspecto presente na redução de arrasto é um limite máximo observado por Virk, Mickley e Smith (1967). Os autores, através de estudos experimentais de redução de arrasto em dutos com diversas soluções poliméricas, observaram um limite máximo de redução de arrasto capaz de ser atingido. Tal limite é chamado de máxima redução de arrasto (MDR) e posteriormente, em homenagem ao autor, também é chamado de Lei de Virk ou assíntota de Virk. Segundo o autor, a MDR pode ser atingida de duas maneiras, uma delas consiste em manter o número de Reynolds do escoamento fixo e incrementar a concentração do polímero na solução até que seja atingida uma concentração crítica onde, a partir dessa, não é mais observado aumento em  $DR$ , atingindo um limite máximo. A outra maneira consiste em manter uma concentração fixa e aumentar progressivamente o número de Reynolds do escoamento, dessa forma,  $DR$  também atinge o limite máximo. A Figura 1.2 mostra a trajetória da redução de arrasto até atingir a MDR, das duas possíveis formas, em coordenadas de Prandtl-von Kármán.

A máxima redução de arrasto ainda não é completamente compreendida e divide opiniões entre os pesquisadores nas teorias viscosa e elástica. Autores como Virk (1975) e Sreenivasan e White (2000) que utilizam a teoria viscosa, sugerem que a MDR ocorre uma vez que o efeito do polímero é sentido em todas as escalas do escoamento, fazendo com que a subcamada de transição seja prolongada por toda a camada limite. Na outra vertente, os pesquisadores que utilizam a teoria elástica, como Warholic *et al.* (1999), Ptasiński *et al.* (2001) e Min *et al.* (2004), creem que a MDR ocorreria quando os tensores de Reynolds são fortemente reduzidos e os mecanismos que sustentam a turbulência são as flutuações das tensões poliméricas. O início da redução de arrasto, “*onset*”, também apresentado na Figura 1.2, ocorre somente em certo nível de turbulência. O início da redução é outro aspecto que divide opiniões entre as teorias viscosa e elástica. Por parte da teoria viscosa, os pesquisadores acreditam que o início da redução acontece quando os vórtices da subcamada de transição se tornam capazes de esticar as moléculas, causando o aumento da viscosidade extensional (Lumley, 1969; Ryskin 1987 e L’vov *et al.* 2004). Já de acordo com a teoria elástica, acredita-se que a redução se inicie quando a energia armazenada pelas moléculas parcialmente esticadas é equiparável à energia

dos vórtices em algumas escalas na região da subcamada de transição, anulando a cascata de Komolgorov prematuramente (Tabor e De Gennes, 1986 e Joseph, 1990).

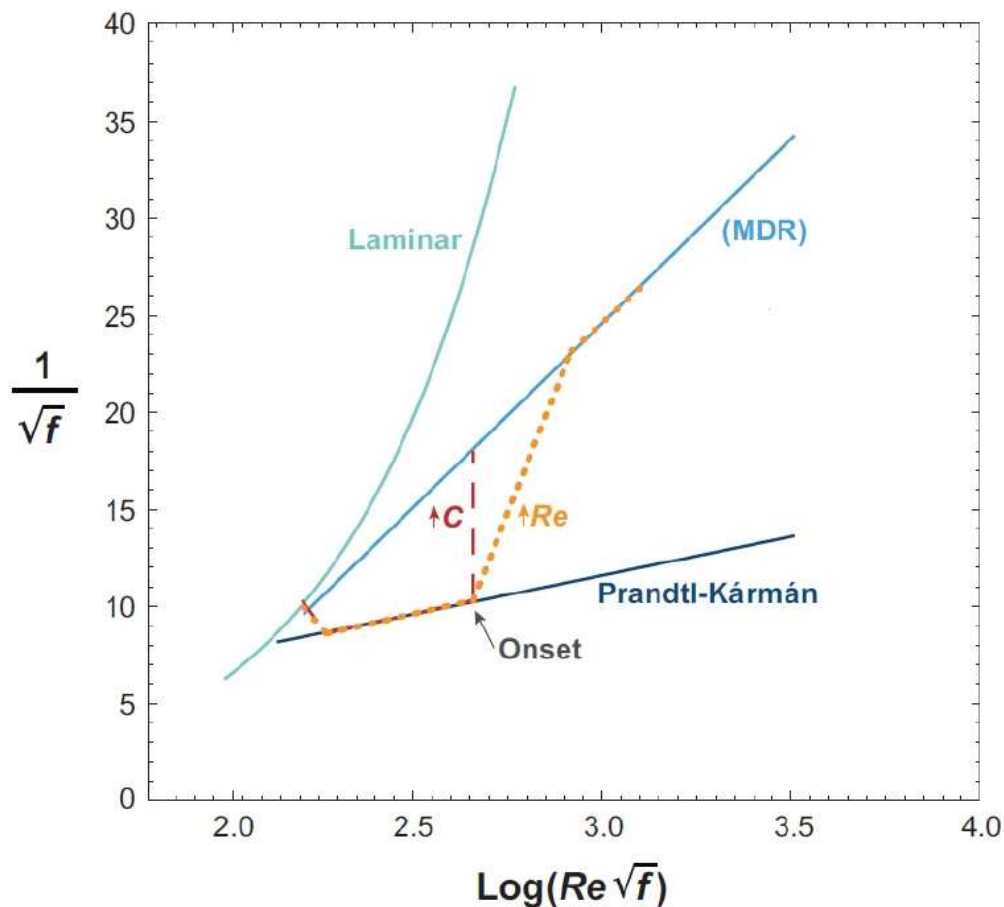


Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008)

Outro aspecto de grande importância, correspondendo a maior desvantagem dos polímeros como agentes redutores de arrasto, é o fenômeno da degradação polimérica. Conforme White e Mungal (2008), esse fenômeno corresponde ao rompimento das macromoléculas, causado pelas tensões do escoamento. A divisão das macromoléculas em moléculas menores, com menor cadeia de monômeros, causa considerável perda de eficiência do aditivo. Aplicando técnicas de cromatografia por exclusão de tamanhos em soluções submetidas a escoamentos controlados, Merrill e Horn (1984) verificam que as cisões ocorrem próximo ao ponto médio das macromoléculas dos polímeros. Os autores acreditam que a degradação ocorra quando as moléculas estão completamente estendidas e alinhadas com o escoamento, fato também apoiado em resultados obtidos anteriormente por Odell,



Keller e Miles (1983) que observam a existência de tal extensão molecular. A Figura 1.3 representa o processo de esticamento e cisão de uma macromolécula em um escoamento turbulento.

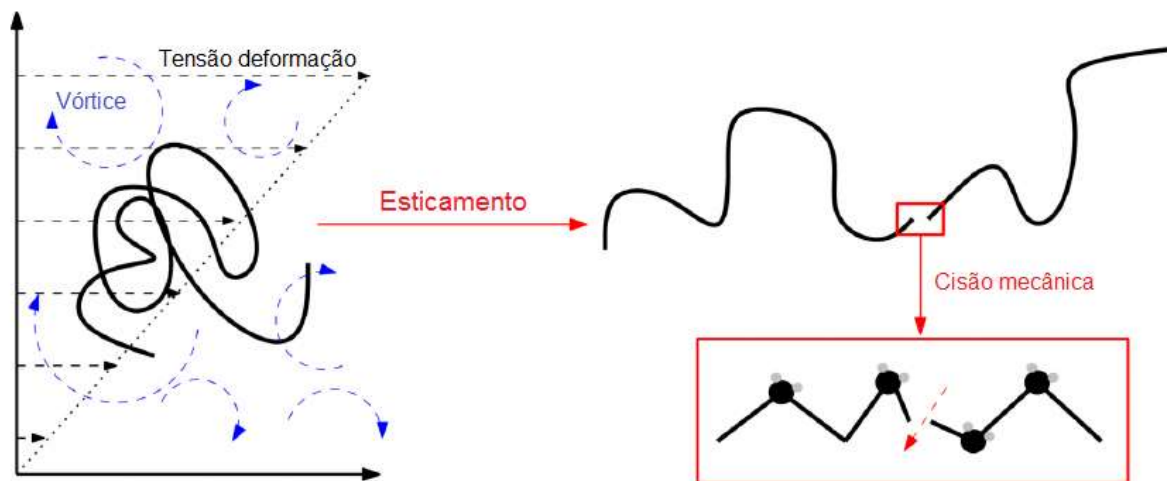


Figura 1.3 – Processo de cisão molecular. Soares *et al.* (2015)

Paterson e Abernathy (1970) estudam o comportamento da degradação em soluções de óxido de polietileno em escoamento turbulento em dutos. Seus estudos mostram que a degradação das moléculas é mais intensa para números de Reynolds mais elevados e que a resistência da solução aumenta com o aumento da massa molecular ou concentração.

Vanapalli, Islam e Solomon (2005) analisam experimentalmente a degradação do óxido de polietileno e da poliacrilamida em escoamento turbulento em dutos. O experimento consiste em induzir o escoamento através de uma tubulação com pressão de entrada constante, sendo esse processo realizado repetidas vezes para a mesma solução. Utilizando a técnica de cromatografia de permeação em gel, é avaliada a variação da massa molecular média da solução após os escoamentos. Os autores observam que, ao longo do processo de degradação, a massa molecular média diminui e após certo número de passes pelo aparato experimental atinge um estado estável. A partir desse ponto, nenhuma degradação é observada e a redução de arrasto atinge um valor assintótico.

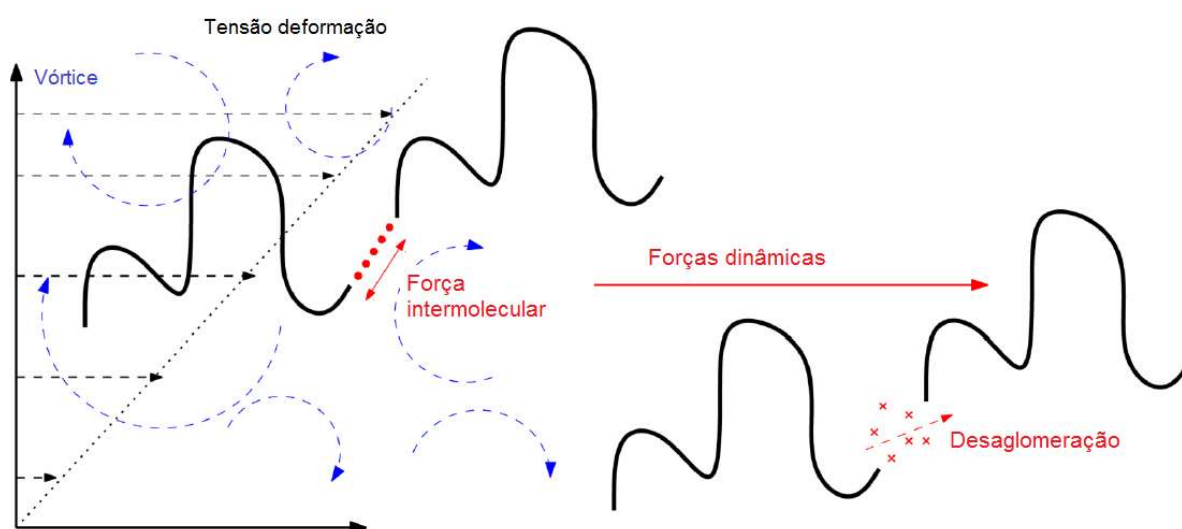
A maioria das teorias e principais aspectos da redução de arrasto leva em consideração a flexibilidade das moléculas. Porém, sabe-se que moléculas rígidas também são capazes de proporcionar redução de arrasto em escoamentos turbulentos. O comportamento das macromoléculas rígidas no escoamento em função de sua capacidade de redução de arrasto é um assunto que ainda precisa ser melhor estudado e não possui definições claras no momento. Diferentes autores como Kenis (1971), Bewersdorff e Singh (1988), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares *et al.* (2015) tem estudado polímeros rígidos como Goma Xantana e Goma Guar entre outros. Os autores constataam o aumento da redução de arrasto com o aumento da concentração e massa molecular, como comportamento de polímeros com moléculas rígidas, assim como ocorre para os polímeros flexíveis.

Virk (1975) propõe dois mecanismos distintos para a redução de arrasto, o Tipo A e o Tipo B. O mecanismo Tipo A está associado aos polímeros que se encontram encolhidos em repouso, possuindo características flexíveis, onde é necessária uma certa taxa de cisalhamento mínima capaz de esticar tais moléculas, iniciando-se assim o processo de redução de arrasto. Já o mecanismo do Tipo B está associado aos polímeros com moléculas rígidas e aditivos como fibras, também rígidos. Tais aditivos possuem sua estrutura já alongada em repouso, onde não apresentam mudanças em sua conformação molecular quando submetidos às taxas de cisalhamento do escoamento.

Os polímeros rígidos podem ser encontrados na natureza como os polissacarídeos. Esses polímeros têm como característica principal a grande resistência à degradação mecânica, representando uma vantagem em relação aos polímeros flexíveis. Por outro lado, no caso de polissacarídeos, por serem polímeros naturais, possuem a desvantagem de serem sensíveis à degradação biológica. Em estudos realizados por Kenis (1971), é feita uma comparação entre diversos polissacarídeos, como a Goma Xantana e Goma Guar, com os polímeros sintéticos flexíveis PEO e PAM. Nesse estudo, é relatado uma maior estabilidade das cadeias poliméricas para os polissacarídeos, em relação ao efeito de degradação. Os mesmos resultados são observados por Sohn *et al.* (2001). Sandoval e Soares (2015) relatam ainda a resistência dos polímeros quando submetido a degradação localizada em uma bomba centrífuga. Os resultados revelam que o polímero rígido Goma Xantana não apresenta variação considerável em termos de redução de arrasto nessa situação, sendo assim,

não é observado degradação adicional na solução, quando comparado ao escoamento sem a presença da bomba em mesmo número de Reynolds. Por outro lado, os polímeros flexíveis PEO e PAM apresentam drástico decaimento de  $DR$ , quando submetidos a degradação localizada da bomba.

Pereira, Andrade e Soares (2013) acreditam que a cisão molecular, característica da degradação polimérica, não implica um papel importante nos polímeros rígidos como a Goma Xantana. Supõe-se então que a solução de Goma Xantana forma agregados compostos por algumas moléculas interconectadas por forças intermoleculares. Dessa forma, as tensões do escoamento turbulento romperiam essas ligações causando a desagregação das moléculas, diminuindo assim o comprimento médio das mesmas, onde, por consequência, causaria o decaimento na eficiência de  $DR$ . Esse mecanismo é ilustrado na Figura 1.4. A existência de tal formação foi constatada anteriormente por Shetty e Solomon (2009). Os autores, utilizando técnica de espalhamento de luz, observam a formação de agregados em soluções de PEO, mesmo em concentrações muito baixas.



**Figura 1.4 – Processo de desagregação molecular. Soares *et al.* (2015)**

Outro tópico de grande interesse sobre o assunto de redução de arrasto é a combinação de polímeros como alternativa para melhorar a eficiência do processo de redução. Lee *et al.* (1974) foi o primeiro a observar um efeito sinérgico ao misturar polímeros e fibras. Outro estudo pioneiro na área é feito por Dingilian e Ruckenstein

(1974), no qual, os autores realizam testes combinando polímeros em diferentes concentrações. No estudo, foram utilizados os polímeros óxido de polietileno, poliacrilamida e carboximetilcelulose, sendo esse último um polímero rígido. Os autores argumentam que dependendo da natureza do polímero, a redução de arrasto provocada pela combinação deles pode se tornar maior ou menor, em comparação com os efeitos individuais obtidos por cada polímero. Seus resultados mostraram que a combinação entre polímeros de moléculas rígidas e flexíveis, especificamente, promove grande benefício para a redução de arrasto. Essa combinação provoca uma redução de arrasto maior que a redução obtida para cada polímero individualmente em mesma concentração. Reddy e Singh (1985) analisam a redução de arrasto de misturas entre dois polímeros e polímero e fibra. Eles relatam o mesmo aspecto de efetividade em combinações de polímeros rígidos com flexíveis. É argumentado que a sinergia na redução de arrasto é atribuída ao aumento do comprimento médio das moléculas, que é causada pela presença simultânea de cada material. Os autores ainda observam que a resistência à degradação da combinação dos polímeros é próxima à média entre os dois polímeros da mistura. Trabalhos realizados por Mohsenipour e Pal (2013) e Steele, Bayer e Loth (2014) sugerem que a presença simultânea de diferentes materiais em um solvente induz mudanças na conformação molecular, podendo alongar ou enrolar, dependendo das características dos materiais. Recentemente, Sandoval e Soares (2016) apontam outra possibilidade, sugerindo que a presença simultânea de diferentes materiais poderia induzir a formação de agregados. Os autores acreditam que tais agregados também podem causar um ganho de eficiência em  $DR$  e resistência molecular.

A maioria dos polímeros utilizados como redutores de arrasto atualmente são polímeros sintéticos, os quais tem como característica baixa resistência as tensões exercidas pelo escoamento turbulento. Esses polímeros podem apresentar toxicidade ao ser humano, impedindo sua utilização em muitas aplicações importantes como as que envolvem as áreas da saúde ou contato com o meio ambiente. Isso tem encorajado um grande número pesquisadores a substituir os polímeros artificiais por polímeros naturais.

Provavelmente, o agente redutor de arrasto natural mais utilizado é a Goma Xantana, um polissacarídeo obtido através da fermentação das bactérias *Xanthomonas*

*Campestris*. Esse aditivo é uma boa alternativa aos sintéticos e suas características como redutor de arrasto foram estudado por diversos pesquisadores como Morris (1977), Muller *et al.* (1986), Bewersdorff e Singh (1988), Wyatt, Gunther e Leberatore (2011), Pereira, Andrade e Soares (2013), Andrade, Pereira e Soares (2014), Soares *et al.* (2015) Sandoval e Soares (2016) e Andrade, Pereira e Soares (2016).

Recentemente, Singh, Jaafar e Yusup (2014) ressaltou o potencial de biopolímeros como agentes redutores de arrasto, especialmente os extraídos dos recursos naturais locais, pois eles não prejudicam o meio ambiente pela contaminação do solo. Em seus estudos, eles utilizaram casca de banana como DRA. O material é sintetizado e convertido em Carboximetilcelulose. Os autores concluem que esse material é um bom redutor de arrasto e sua solubilidade aumenta com o aumento da concentração de NaOH.

Outro redutor de arrasto natural comumente utilizado é a Goma Guar. Phukan *et al.* (2001) conduziu uma interessante análise comparando o desempenho de Goma Guar comercial com sua versão purificada para melhorar a irrigação por aspersão e a percolação no solo. Foi notado que a Goma Guar purificada é mais eficiente que a versão comercial. Eles observaram um aumento na área de cobertura no processo de irrigação em adição a um decréscimo na taxa de infiltração. Dessa forma, os principais efeitos dos bio-agentes redutores são extremamente úteis para áreas com déficit de chuvas.

Ogata e Warashina (2014) usou Nata de Coco em suspensão como DRA para um sistema de escoamento em dutos. Como resultado foi encontrado uma redução acima de 25% com uma concentração menor que 50 ppm. É observado que o efeito de redução aparece apenas quando a Nata de Coco forma uma rede em suspensão e *DR* aumenta com o aumento do tamanho das fibras.

Gasljevic *et al.* (2008) conduziu uma série de experimentos para avaliar a aplicabilidade de polissacarídeos produzidos por microalgas marinhas como agentes redutores de arrasto. Várias espécies foram testadas em termos de produtividade e capacidade de redução de arrasto do polissacarídeo produzido. Muitas espécies demonstraram bom desempenho em ambos os aspectos.

Kameneva (2012) utilizou Aloe Vera (babosa) como agente redutor de arrasto para produzir efeitos hemodinâmicos em cobaias animais, aumentando a perfusão tecidual e diminuindo a resistência vascular periférica sem afetar a viscosidade. Neste trabalho, a autora mostra que a perfusão tecidual pode ser aumentada sem aumentar a pressão arterial sanguínea, que é extremamente importante para a ressuscitação volêmica<sup>2</sup> em casos de hemorragias graves, pois um aumento na pressão arterial pode induzir hemorragias secundárias no receptor.

A utilização de mucilagem de quiabo como agente redutor de arrasto é relativamente recente e não possui muitos estudos disponíveis na literatura. Alguns estudos utilizando mucilagem de quiabo como agente redutor de arrasto foram conduzidos basicamente por Abdulbari e colaboradores (Abdulbari *et al.*, 2010, 2011, 2012, 2014). Abdulbari, Ahmad e Yunus (2010) avalia os efeitos da variação de diâmetro, concentração de polímero e número de Reynolds na redução de arrasto. Em um segundo trabalho, os autores (Abdulbari, Kamarulizam e Man, 2011) apontam o baixo custo do quiabo como uma vantagem de seu uso como DRA. Abdulbari, Kamarulizam e Nour (2012) também avalia o uso da mucilagem de quiabo como DRA, desta vez utilizando dois diferentes fluidos como solvente, água e hidrocarboneto líquido. Um processo para modificação da molécula foi utilizado para tornar a mucilagem solúvel em hidrocarboneto. Finalmente, no último trabalho da sequência, Abdulbari, Shabirin e Abdurrahman (2014) apresenta uma boa revisão de biopolímeros como agentes redutores de arrasto. Seus estudos enfatizam o potencial dos biopolímeros, entre os quais está a mucilagem de quiabo, como agentes redutores e indicam que eles são uma boa alternativa aos redutores artificiais.

Tudo isso indica que a mucilagem de quiabo é um agente redutor de arrasto promissor, porém mais estudos são necessários para maior esclarecimento sobre seu comportamento quando submetido a escoamentos turbulentos.

---

<sup>2</sup> Medida a ser tomada para restabelecimento do volume plasmático para garantir a manutenção da pressão arterial e do débito cardíaco.

### **1.3 Caracterização do problema**

Os polímeros sintéticos são incapazes de atender a todas as áreas de interesse da aplicação da redução de arrasto e isso ocorre devido algumas de suas características, como a baixa resistência à degradação mecânica e ao fato de serem tóxicos e nocivos ao meio ambiente. Atualmente, poucos são os agentes redutores de arrasto naturais adequadamente estudados e disponíveis para aplicações práticas. Com o intuito colaborar com os estudos de novos agentes redutores de arrasto naturais, mais resistentes, degradáveis e atóxicos, o presente trabalho estuda a capacidade e as características de redução de arrasto por adição dos polímeros e fibras extraídos do quiabo em escoamentos turbulentos em tubos.

Para a obtenção do material de estudo se faz necessário desenvolver um método de processamento da fruta, uma vez que o material, nas condições desejadas para teste, não se encontra disponível comercialmente. Ao final do processamento é obtido um pó que é utilizado como agente redutor de arrasto.

## **CAPÍTULO 2**

### **ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

#### **2.1 Equipamentos**

Nessa seção são apontados os principais equipamentos utilizados neste trabalho, sendo também descrito suas principais funções e características.

##### **2.1.1 Bancada experimental**

A redução de arrasto tem sido estudada experimentalmente por diferentes métodos ao longo dos tempos. Um dos principais métodos utilizados é o por geometrias rotativas, o qual tem apresentado bons resultados, como reportado por Andrade, Pereira e Soares (2014). Porém tal metodologia gera um escoamento com características distintas das normalmente encontradas na prática. A necessidade de observar o fenômeno em uma abordagem mais adequada para a utilização prática, levou muitos autores a dirigirem as pesquisas para o estudo de redução de arrasto em dutos, mesmo sendo um procedimento que exija grandes instalações laboratoriais, com elevado custo e demanda de tempo experimental, necessitando de amostras muito volumosas no procedimento.

Uma bancada experimental formada por tubulações retas de seção circular, por onde a solução é conduzida ao ser impulsionada por uma bomba centrífuga, é utilizada neste trabalho. Entre os elementos que constituem a bancada experimental se destacam: um medidor de vazão magnético, três transdutores de pressão estática, um vaso de pressão, uma bomba centrífuga e um inversor de frequência.



### 2.1.2 Reômetro

Para análise da viscosidade das soluções estudadas é utilizado um reômetro modelo HAAKE MARS II acoplado a um banho para controle de temperatura modelo Thermo Haake Phoenix II – P1-C50P, ambos fornecidos pela Thermo Scientific, mostrados na Figura 2.1, com seus principais componentes. Esse reômetro necessita do suporte de um compressor para seu funcionamento, uma vez que utiliza rolamento a gás em seu eixo de teste. Para esta função é utilizado um compressor odontológico isento de óleo modelo MC6 BPV RV 60L fornecido por Chiaperini Industrial. Esse mesmo reômetro foi utilizado nos trabalhos de Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014).



Figura 2.1 – Reômetro Haake Mars II.

### 2.1.3 Balanças

Para a pesagem da água utilizada em testes na bancada é utilizada uma balança semi-analítica do modelo WT 1000 classe III da fabricante WEIGHTTECH, com capacidade máxima de 50 kg e precisão de leitura de 10g. Já para pesagens de

soluções e fibras com polímeros são utilizadas uma balança analítica eletrônica, modelo ABT 302-4M da fabricante KERN & SOHN GmH, com precisão de leitura de 0,1 mg e uma balança semi-analítica com capacidade de 2200 g e resolução de 0,01 g do modelo B-TEC-2200 da fabricante TECNAL.

## 2.2 Produção do material de teste

Neste trabalho uma mistura de polímeros e fibras constituintes do quiabo (*Abelmoschus esculentus L. Moench*) é utilizado como agente redutor de arrasto. O quiabo é previamente submetido a algumas etapas de processamento para a obtenção de sua forma final a ser utilizada. O processamento do quiabo é realizado em três etapas. Primeiramente, a fruta é lavada e suas sementes são removidas, devido ao fato de não possuírem o polímero requerido. Em sequência, a fruta segue para secagem em uma estufa, na qual é mantida a uma temperatura próxima a 50 °C, por tempo suficiente para que atinja um valor de massa constante. A temperatura escolhida leva em consideração a secagem mais rápida possível preservando a integridade física e química do material. Uma temperatura superior poderia causar degradação dos componentes termolábeis presentes no quiabo, conforme reportado por Lee *et al.* (2015). Por fim, a fruta seca é triturada e submetida a um processo de peneiramento. A malha mais fina utilizada é de 106 micrometros, realizando assim o controle do tamanho das fibras. Os resultados dessas etapas podem ser vistos na Figura 2.2. Observando a figura, a primeira imagem, da esquerda para a direita, mostra o quiabo em sua forma integral, a segunda mostra ele limpo, cortado e com suas sementes removidas, a imagem seguinte mostra a fruta após o processo de secagem e, por fim, a última imagem mostra o produto triturado e peneirado, utilizado como redutor de arrasto.



Figura 2.2 – Etapas de processamento do quiabo.

## 2.3 Descrição dos testes no aparato experimental

Seguindo o esquema presente na Figura 2.3, primeiramente 100 litros do solvente (água filtrada) são depositados no reservatório onde em seguida é adicionado o material de estudo (fibras de quiabo com polímeros) em quantidade equivalente a concentração a ser avaliada. A solução é deixada em repouso tempo suficiente para que haja a liberação e diluição do polímero no solvente e, em seguida, é suavemente misturada por 10 minutos para que ocorra a total homogeneização da mesma. Após realizado o preparo da solução no reservatório, uma pequena amostra é extraída para medição da viscosidade e, então, o restante é escoado por uma tubulação flexível de retorno de 1,5" até o vaso de pressão por ação da gravidade. Quando a solução se encontra totalmente depositada no vaso de pressão, inicia-se o seu escoamento pelo circuito hidráulico de teste, sendo esse impulsionado pela bomba centrífuga em rotação constante de 3000 rpm. Para este trabalho foi utilizado uma bomba centrífuga de um estágio, modelo CAM-W6C fabricada pela empresa Dancor.

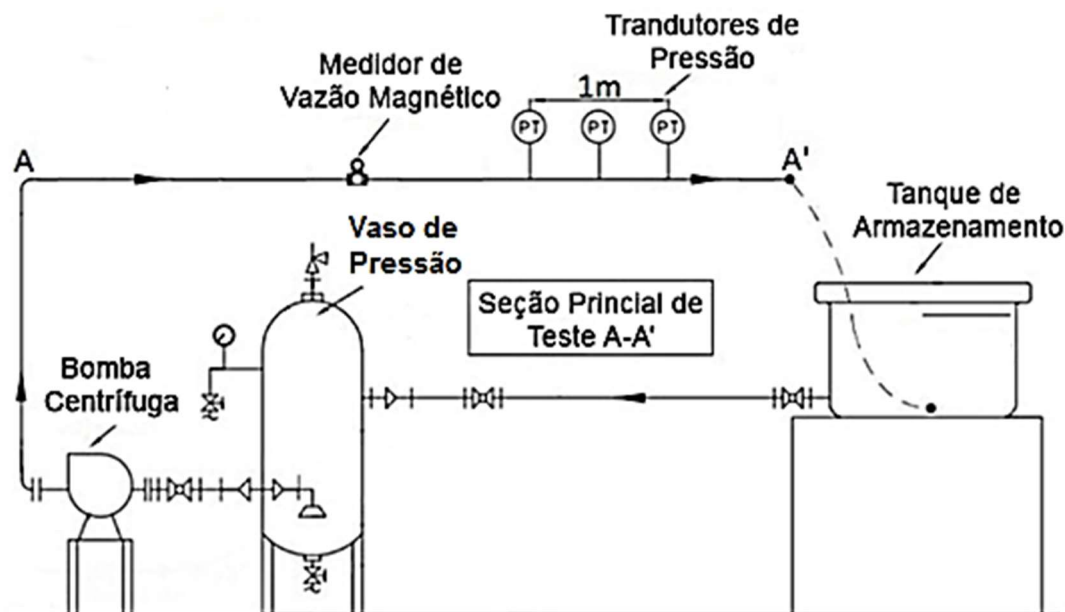


Figura 2.3 – Desenho esquemático da bancada experimental.

Na secção principal de teste (A-A') foram instalados um medidor de vazão magnético (modelo Rosenmount 8732, fabricante Emerson Progress) com incerteza de 0,5% e três transdutores de pressão estática, localizados em um ponto onde o escoamento turbulento é completamente desenvolvido ( $l/D = 400$ ). Os transdutores (modelo WTP – 4010, fabricante Warme) possuem faixa de medição de 0 a 500 kPa (4 a 20 mA), com incerteza de 0,0057 mA, e encontram-se alocados em pequenos orifícios produzidos em um tubo de aço inoxidável de 1400 milímetros de comprimento, dispostos em série entre distâncias de 500 milímetros para as tomadas de pressão. O tubo, onde estão alocados os transdutores, possui um diâmetro interno de 16,35 milímetros rigorosamente controlado, sendo tratado por brunimento e medido por meio de micrômetro interno (*Fur-o-test*) em diferentes pontos.

Após toda a solução, inicialmente no vaso de pressão, passar pela tubulação de teste, com um total de 13,5 metros de comprimento, ela se aloja novamente no reservatório. Os tubos de teste são termicamente isolados, para minimizar a transferência de calor com o ambiente, e os teste são realizados a um temperatura média de 27 °C.

A vazão do escoamento e os valores de pressão estática na seção de teste nos diferentes pontos são coletadas simultaneamente por meio de um supervisor desenvolvido na plataforma LabVIEW da National Instruments. Esse supervisor está

associado a uma placa de aquisição de dados NI – 6008 capaz de realizar as leituras em tempo real dos transdutores e medidor de vazão.

Quando toda amostra do teste, inicialmente no vaso de pressão, passa pela tubulação de teste, um ciclo de leitura de dados é realizado. Em sequência, a solução, agora com moléculas parcialmente desagregadas, retorna do reservatório para o vaso de pressão por gravidade, em um escoamento lento, de modo a evitar qualquer desagregação não controlada do polímero, sendo assim, um ciclo (também chamado de passe) é completado e a mesma solução é então utilizada para o próximo ciclo.

O valor do fator de atrito é calculado passe a passe continuamente até que não seja observada mudanças no mesmo. Esse processo permite verificar o aumento do fator de atrito ocorrido pela desagregação polimérica em cada passe. São necessários 30, 40 ou 50 passes, dependendo da concentração polimérica na solução, para alcançar o valor constante de fator de atrito em função do escoamento promovido pela bomba em mesma rotação.

Sabendo a velocidade média do escoamento ( $\bar{u}$ ), viscosidade ( $\eta$ ) e densidade ( $\rho$ ) da solução juntamente com o diâmetro da tubulação ( $D$ ), o número de Reynolds é obtido pela seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\eta}. \quad (4)$$

Levando em consideração o diâmetro constante, com o escoamento completamente desenvolvido, o cálculo do fator de atrito de Darcy da bancada é realizado pela seguinte equação:

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

A determinação do percentual de redução de arrasto ( $\%DR$ ) é calculado em função da razão entre os fatores de atrito da solução ( $f$ ) e do solvente ( $f_0$ ), como definido por Lumley (1969), e apresentado na Equação 3 ( $\%DR = (1 - f_0/f) \times 100$ ).

### 2.3.1 Procedimento para estimativa do tempo de diluição

Com o intuito de avaliar o tempo necessário para a diluição do material de teste no solvente são realizados testes seguindo o procedimento já descrito para a bancada experimental, usando concentrações fixas de 400 ppm variando o tempo para diluição da solução no reservatório. Os tempos de diluição utilizados para esta avaliação foram de 1, 2 e 3 horas. Observa-se então a influência de sua variação na capacidade de redução de arrasto.

### 2.3.2 Procedimento para análise do efeito da variação de concentração

Ainda seguindo o procedimento de teste na bancada experimental já descrito, após estimado o tempo de diluição, são realizados testes com o intuito de avaliar a influência da variação da concentração do material em solução na capacidade de redução de arrasto. Dessa forma, são produzidas e testadas amostras em diferentes concentrações de 100, 200, 400, 800 e 1600 ppm. Nesse procedimento, é investigado qual a influência da variação da concentração tanto na capacidade de redução de arrasto absoluta quanto, separadamente na capacidade de aumento de vazão e decaimento de pressão. Também são avaliadas as variações de redução de arrasto máxima e mínima apresentadas nos testes.

### 2.3.3 Testes de degradação biológica

Uma variação do procedimento descrito é utilizada para a avaliação do efeito da biodegradação na capacidade de redução de arrasto do material. Nesse caso, após a solução testada atingir o valor constante de porcentagem de redução de arrasto, ao invés de ser descartada, ela é cuidadosamente estocada e posteriormente reutilizada após períodos de tempo determinados. A estocagem é realizada em recipientes

vedados de 50 litros, dispostos em condições de temperatura ambiente. Os tempos de estocagem utilizados são de 1, 2, 5, 6 e 7 dias em sequência, para a mesma amostra. Em cada tempo determinado, são realizados 10 passes para avaliar a influência da biodegradação ocorrida na solução sobre a capacidade de redução de arrasto da mesma.

#### 2.3.4 Testes para análise do efeito da fibra

Com o objetivo de analisar o efeito causado pela presença da fibra, um método diferente de preparo da solução é utilizado. Nesse método, inicialmente são adquiridos 30 kg de quiabo de uma mesma safra. Todo esse quiabo é limpo, fatiado ao meio, tem suas sementes removidas e, for fim, metade segue para secagem na estufa, sendo esta parcela posteriormente processada para a obtenção do pó, da mesma forma que descrito na seção 2.2. A outra metade é submergida em 120 litros de água filtrada, onde permanecem por aproximadamente 10 horas. Esse segundo processo faz com que o polímero presente no quiabo seja liberado na água, dessa forma o quiabo estará submerso agora em uma solução polimérica aquosa. Após o período submerso, toda a solução é filtrada em tecido (tule 100% poliéster), separando assim a fruta da solução polimérica aquosa. De toda a solução polimérica filtrada, uma amostra é extraída, para a medição de viscosidade e concentração, e o restante é utilizado na bancada experimental de redução de arrasto conforme o procedimento já descrito na seção 2.3.

A amostra retirada para determinar a concentração da solução é dividida em cinco recipientes de vidro. A massa contida em cada recipiente é obtida por pesagem e em seguida os recipientes com as amostras são levados à estufa para secagem. Após total secagem das amostras (massa constante), a massa do material seco (polímeros) é obtida também por pesagem. Sabendo-se então as massas da soluções inicial e dos polímeros que estavam condidos na mesma, é possível calcular sua concentração. A Tabela 2.1 mostra a pesagem realizada nesse procedimento, onde cada valor de massa apresentado é obtido pesando-se a respectiva amostra três vezes e calculando a média.

Tabela 2.1 – Massas obtidas por pesagem e respectivas concentrações.

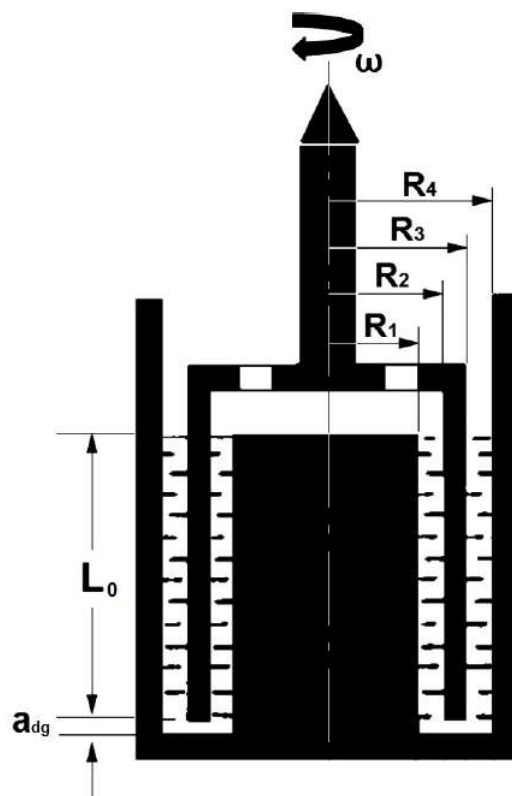
Amostras	Massa da solução (g)	Massa de polímero (g)	Concentração (ppm)
1	191,104	0,0651	340
2	174,868	0,0628	359
3	202,444	0,0709	350
4	569,43	0,2019	354
5	537,243	0,1916	356
		<b>Média</b>	352

Determinada a concentração da amostra da solução puramente polimérica utilizada na bancada, o pó obtido com o quiabo da mesma safra é utilizado no preparo de uma solução de mesma concentração, porém, desta vez com a presença de fibras. A capacidade de redução de arrasto dessa solução feita com as fibras também é analisada na bancada experimental e os resultados são comparados com os encontrados para a solução sem fibras.

### 2.3.5 Medição da viscosidade

Como mencionado anteriormente, um reômetro é utilizado para a medição da viscosidade. Para esta medição é utilizado uma geometria rotativa formada por cilindros concêntricos de dupla folga, *Double Gap Cylinder Sensor System* de acordo com a norma DIN 53544, como indicado na Figura 2.4. Essa geometria tem como característica a capacidade de obter resultados com boa precisão em líquidos com baixas viscosidades. Devido sua grande área de contato, essa geometria permite que líquidos de baixa viscosidade sejam capazes de gerar um torque no eixo com intensidade adequada para leitura do equipamento. Seus parâmetros geométricos, seguindo as indicações da Figura 2.4, são de  $R_1 = 17,75$  mm,  $R_2 = 18,00$  mm,  $R_3 = 21,40$  mm e  $R_4 = 21,70$  com o comprimento do rotor  $L_0 = 55$  mm, e a distância do rotor ao fundo do copo  $a_{dg} = 5,1$  mm, sendo o volume total no interior do copo igual a 6,0 ml. Essa mesma geometria foi utilizada por Andrade, Pereira e Soares (2014).





**Figura 2.4 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução. Pereira Andrade e Soares (2013)**

No procedimento de teste da bancada, conforme citado, a solução é preparada no reservatório. Antes de ser encaminhada para o vaso de pressão, uma pequena amostra é recolhida. Esta amostra é depositada no interior da geometria, entre duas superfícies axissimétricas rígidas. Uma é um copo fixo e outra um rotor constituído por um cilindro de paredes finas coaxiais que gira em torno do eixo com uma velocidade angular pré-determinada.

Uma variação da velocidade angular no rotor de 0 a 3000 rpm, em um período de 600 segundos, é conduzida para realização dos testes. Nesse tempo, 600 medições são realizadas linearmente (ou seja, 1 ponto por segundo). Em fundamento, o torque ocorrido no eixo em determinada taxa de deformação do fluido é um parâmetro proporcional a viscosidade e, dessa forma, esta pode ser determinada. Essa taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) pode ser descrita como função da velocidade angular do rotor ( $\omega$ ) e o fator geométrico ( $k$ ), correspondente a geometria, conforme a seguinte equação:

$$\dot{\gamma} = k\omega. \quad (4)$$

onde, para a geometria *double gap*,  $k$  é expresso por,

$$k = \frac{2R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} = \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}. \quad (5)$$

A tensão de cisalhamento nominal ( $\tau$ ) é relacionada ao torque medido no rotor ( $T_{dg}$ ) e aos parâmetros geométricos, sendo  $\delta$  a razão entre os raios ( $\delta = R_2/R_1 = R_4/R_3$ ). A tensão de cisalhamento nominal pode ser expresso por:

$$T_{dg} = \frac{4\tau\pi L_0(\delta^2 R_3^2 + R_2^2)}{1 + \delta^2}. \quad (6)$$

Assim, a viscosidade pode ser obtida a partir de sua definição, sendo:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (7)$$

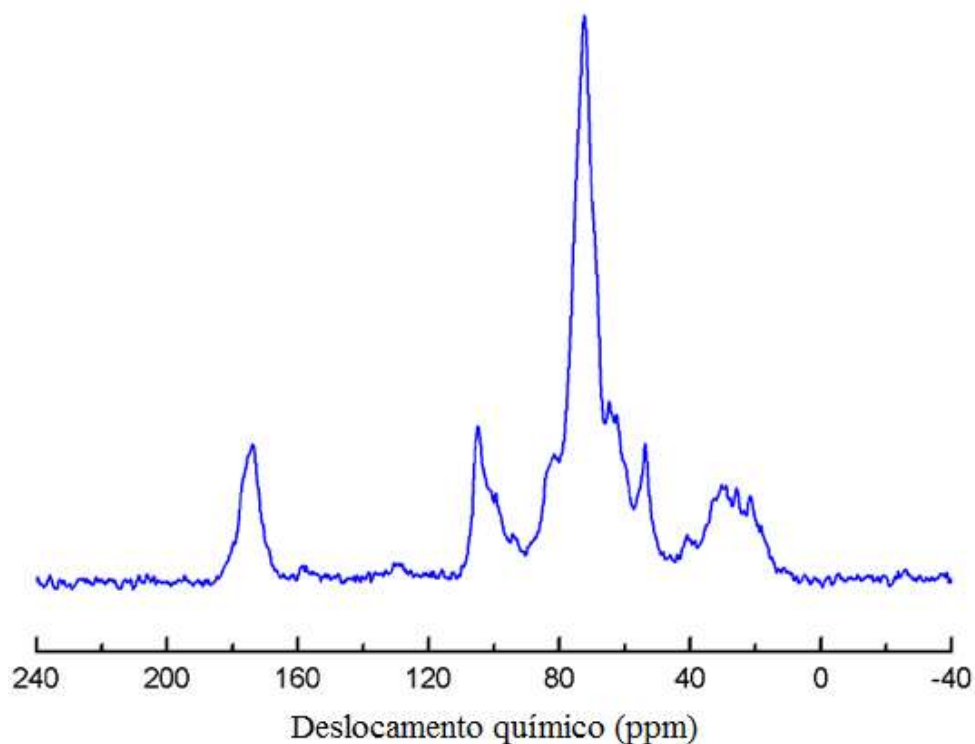
A medição de viscosidade da solução é obtida na faixa de rotação onde o escoamento apresenta característica laminar, pois após esta faixa ocorrem instabilidades na mesma. A temperatura para a medição é controlada em 27 °C, correspondendo a temperatura média dos testes realizados na bancada.

## 2.4 Caracterização do material e da solução

A composição do material é analisada usando a técnica de Ressonância Magnética Nuclear do Estado Sólido (RMN), uma ferramenta poderosa para a análise de características químicas de substâncias orgânicas e inorgânicas encontradas na

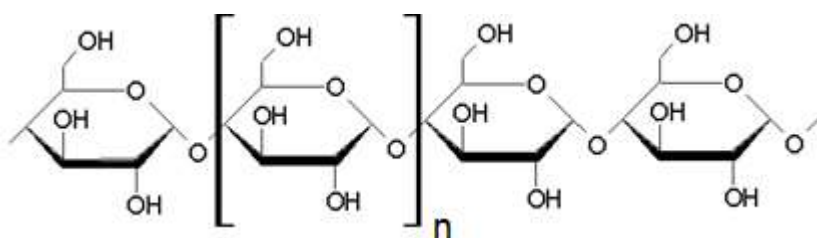
forma de materiais cristalinos ou amorfos. Utilizando técnicas especiais como Rotação em torno do Ângulo Mágico (MAS, do termo em inglês *Magic Angle Spinning*) e Polarização Cruzada (CP, do termo em inglês *Cross Polarization*), é possível obter os espectros de RMN para amostras sólidas com resolução suficientemente alta para permitir a distinção de diferentes grupos químicos, de acordo com as frequências de ressonância correspondentes aos núcleos atômicos presentes em cada grupo molecular. Quando se trata de substâncias orgânicas ou a base de carbono, a Ressonância Magnética Nuclear de Carbono-13 (RMN  $^{13}\text{C}$ ) é um dos métodos mais utilizados para caracterização química.

Para avaliar a composição química do pó de quiabo produzido, é realizado um teste de Ressonância Magnética Nuclear de Carbono-13, obtendo-se um espectro característico mostrado na Figura 2.5. Conforme descrito por Coelho *et al.* (2016), os picos observados no espectro são consistentes com a composição tipicamente conhecida do quiabo em relação aos principais componentes químicos: carboidratos, lignina, proteínas e lipídios. O espectro possui um pico intenso ocorrido em 72 ppm, comum a muitos tipos de carboidratos, incluindo celulose e amido. Os picos menos intensos em 64, 84 e 105 ppm também são atribuídos a carboidratos. Alguns sinais de baixa intensidade encontrados na faixa de 120-160 ppm podem ser devido a carbonos aromáticos em ligninas e a carbonos olefínicos em lipídios. O pico agudo em 54 ppm pode ter contribuições do grupo metoxi em lignina e de carbonos ligados por nitrogênio em proteínas. O pico bem definido em 174 ppm e o conjunto de picos na faixa de 20-40 ppm são atribuídos aos grupos carbonila e alifáticos em aminoácidos presentes em proteínas, respectivamente. É importante mencionar que os espectros da RMN  $^{13}\text{C}$  de estado sólido foram registrados para diferentes amostras do pó de quiabo estudado e não houve diferenças significativas em termos de deslocamento químico e intensidade dos picos detectados. Sendo assim, pode-se concluir que o pó de quiabo utilizado neste trabalho apresenta composição química consistente com o esperado para esse produto e que o material de estudo é quimicamente homogêneo.



**Figura 2.5 – Espectro de ressonância magnética do pó de quiabo.**

Na análise de RMN  $^{13}\text{C}$  percebe-se que a maior parte da composição do material é representada por carboidratos que provavelmente se apresentam na forma de polissacarídeos, os quais são considerados polímeros biológicos. Os polissacarídeos são macromoléculas compostas de muitos monossacarídeos, tendo como característica elevada massa molecular que depende da quantidade de monossacarídeos presentes em sua formação. O amido por exemplo é um carboidrato polissacarídeo formado por ligações de moléculas de glicose. A Figura 2.6 mostra um trecho de uma macromolécula de amido, onde  $n$  é o número de moléculas que constituem o composto, podendo ultrapassar 1 milhão de unidades.



**Figura 2.6 – Parte de uma macromolécula de amido. Solomons e Fryhle (2006)**

Outro elemento presente na composição do quiabo e sua mucilagem são as proteínas. As proteínas também são consideradas polímeros biológicos, sendo formadas pela junção de diversas moléculas de aminoácidos e assim como os polissacarídeos podem apresentar elevada massa molecular. A Figura 2.7 mostra parte de uma macromolécula de proteína, onde  $n$  é o número de moléculas de aminoácidos que constituem o mesmo.

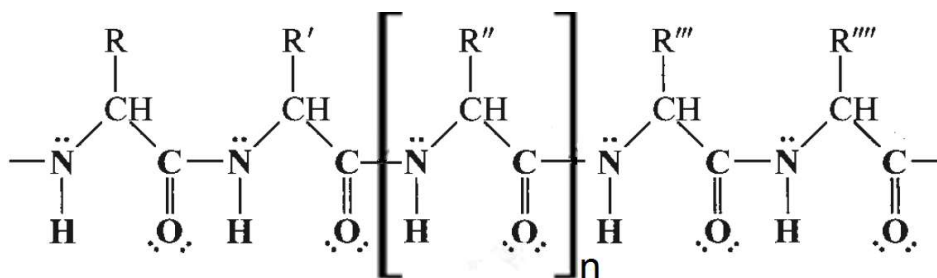


Figura 2.7 – Parte de uma macromolécula de proteína. Solomons e Fryhle (2006)

Uma simples caracterização reológica da solução de pó de quiabo em água também é realizada para uma faixa de concentrações. Para tal, são feitos testes no reômetro, onde também é utilizada a geometria *Double Gap*. As amostras para teste são obtidas a partir da diluição de uma solução concentrada de 10000 ppm. Tal solução é preparada depositando-se cuidadosamente o polímero em pó sobre a superfície da água deionizada. Para que a solução fique homogênea, um bastão de vidro é utilizado para misturar a solução de forma suave. Após obter uma solução concentrada homogênea, essa amostra é diluída, passando às concentrações de 5000, 2500, 1000, 500, 250, 100 e 50 ppm. O procedimento de agitação para homogeneização é aplicado nas amostras após a diluição da solução concentrada antes de iniciar cada teste. O teste consiste em variar a taxa de deformação de  $10^{-2}$  até  $10^4$   $1/s^{-1}$  por 600 segundos, onde a distribuição e aquisição dos dados são feitas na escala logarítmica e 600 pontos são adquiridos, gerando como resultado um gráfico de viscosidade em função da taxa de deformação mostrado na Figura 2.8.

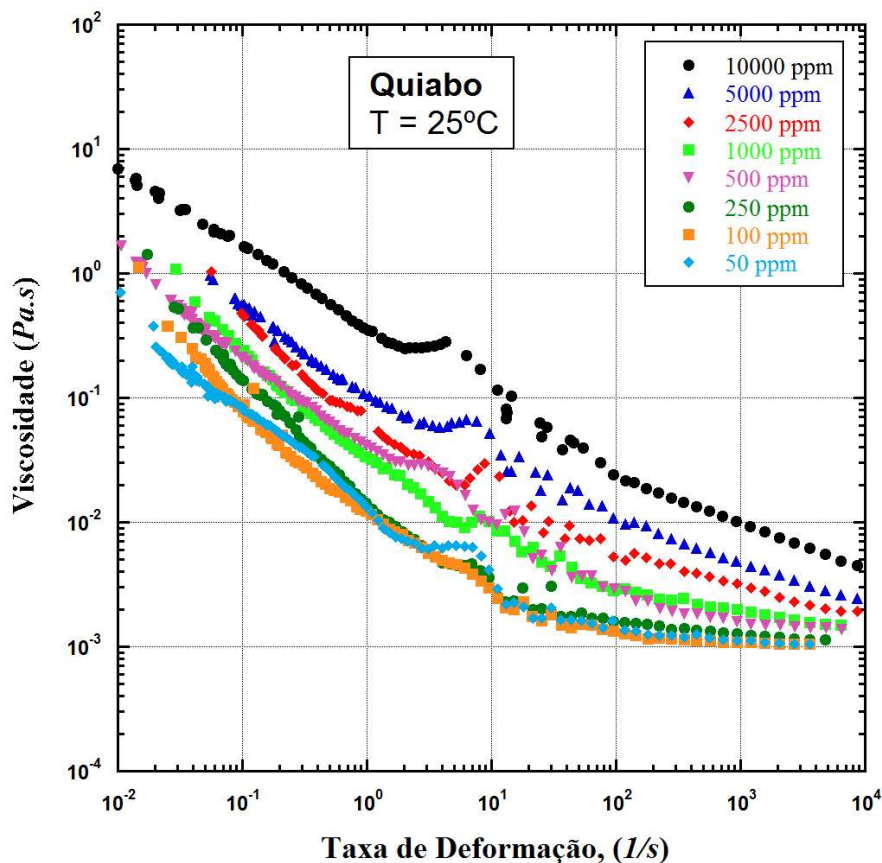


Figura 2.8 – Variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento.

Observando a Figura 2.8, claramente, os resultados mostram um comportamento de fluido afinante (*shear thinnig*), mesmo para a concentração mais baixa de 50 ppm. Observa-se que para a faixa de concentração de 50 ppm a 250 ppm a viscosidade em altas taxa de deformação,  $\eta_{\infty}$ , é próxima à da água pura ( $\eta = 10^{-3}$  Pa.s). Acredita-se que os picos de viscosidade encontrados próximos à taxa de deformação de  $10 \text{ s}^{-1}$  correspondam a um erro, provocado pela presença das fibras na solução, sendo, provavelmente, o instante em que estas entram em suspensão no escoamento.

## 2.5 Critério estatístico para rejeição dos dados

Conforme já mencionado, a coleta de dados dos equipamentos de medição ocorre com o auxílio do programa LabVIEW. Em tempo real, em pleno funcionamento do experimento, os dados são lidos e armazenados. Cada passe (transporte da solução

do vaso de pressão para o reservatório) dura aproximadamente 60 segundos e, neste período, são adquiridos 60 dados, ou seja, um dado por segundo. Em meio a coleta de dados, possíveis perturbações momentâneas no escoamento ou no funcionamento da bomba geram leituras anormais, formando um conjunto de dados discrepantes e atípicos na amostra de dados. Esses dados atípicos precisam ser eliminados para que não interfiram nos resultados médios e, para tal, é utilizado neste trabalho o critério de rejeição de dados de Chauvenet. Esse critério permite identificar se um valor amostral específico é discrepante em relação aos demais valores da mesma amostra. Levando em consideração uma distribuição normal, o critério estabelece que se a probabilidade de ocorrência de um desvio específico de um valor amostral for menor que  $1/(2N)$ , onde  $N$  refere-se ao total de valores da amostra, esta leitura pode ser rejeitada. A Tabela 2.2 apresenta valores instituídos pelo critério de Chauvenet para a razão entre o máximo desvio aceitável ( $d_{max}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ), para diferentes números de leituras na amostra.

**Tabela 2.2 – Critério de Chauvenet**

Número de Leituras ( $N$ )	$d_{max}/\sigma$
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,8
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
500	3,29
1000	3,48

Ao se aplicar o critério de Chauvenet, primeiramente deve ser calculado a média e desvio padrão do conjunto de dados da amostra, sendo assim possível calcular o desvio particular de cada valor. Em seguida, é feita a razão entre cada desvio

particular e o desvio padrão, a qual é comparada com o valor adequado na Tabela 2.2, onde, em caso de ser superior ao aceito pelo critério, o dado correspondente é excluído. Como a aquisição de dados neste trabalho corresponde a aproximadamente 50 pontos, a razão entre máximo desvio aceitável e desvio padrão utilizada como critério é de 2,57. Por fim, após a exclusão dos dados discrepantes, uma nova média e desvio padrão devem ser calculados. Neste trabalho o critério de Chauvenet foi aplicado para todos os dados de vazão e pressão presentes.



## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS**

#### **3.1 Resultados preliminares**

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em testes preliminares. Tais resultados tem como objetivo resguardar a metodologia experimental empregada para os testes principais.

##### **3.1.1 Validação da bancada**

Inicialmente, são realizados testes com o objetivo avaliar a confiabilidade do equipamento para realização dos experimentos. Para avaliar a bancada, 100 litros de água filtrada são utilizados, realizando diversos passes pela tubulação de teste. Cada passe é feito em uma rotação diferente da bomba, correspondendo a um certo número de Reynolds, sendo assim, os testes compreendem uma faixa de número de Reynolds de 45000 até 100000. Após a realização dos testes, o fator de atrito de Darcy é calculado e avaliado em função do número de Reynolds como mostrado na Figura 3.1.

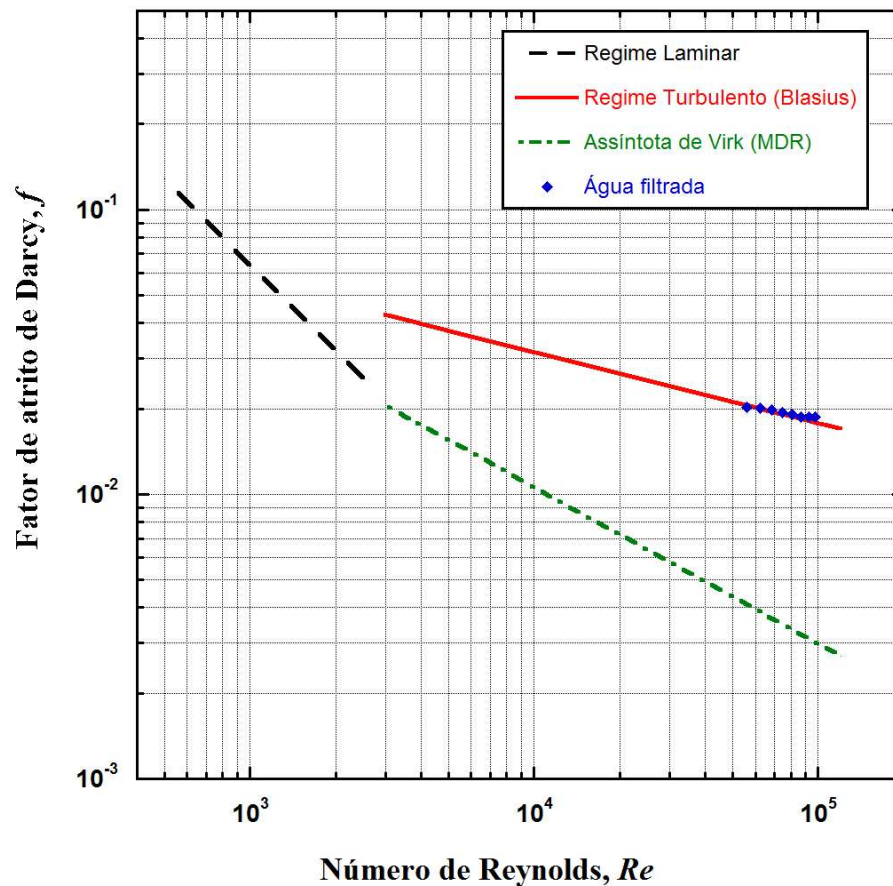


Figura 3.1 – Teste de validação da bancada experimental.

Nesse gráfico, a linha preta tracejada representa o fator de atrito para regime laminar ( $f = 64/Re$ ), enquanto a linha contínua vermelha representa o fator de atrito em escoamentos turbulentos de água em tubos lisos, obtido pela correlação de Blasius ( $f_{blasius} = 0,31 * Re^{-0.25}$ ). A linha verde, traço e ponto, representa a assíntota de Máxima Redução de Arrasto (MDR), lei de Virk ( $f_{virk} = 1,68 * Re^{-0.55}$ ). Finalmente, os símbolos (losangos azuis) são os dados medidos para o escoamento de água filtrada, que estão muito próximos da correlação de Blasius. Como já mencionado, a seção de teste é composta por um tubo de aço inoxidável com tratamento interno de brunimento, dessa forma, devido à baixa rugosidade obtida nesse tratamento, o escoamento pode ser considerado como em tubo liso. Comparando os dados experimentais com a correlação de Blasius, podemos observar um acréscimo na diferença entre eles, relacionadas ao aumento do número de Reynolds. De fato, a máxima diferença encontrada entre os dados experimentais obtidos e a correlação de Blasius é de aproximadamente 3%, correspondendo ao número de Reynolds mais

elevado, demonstrando uma boa precisão do equipamento para o propósito do trabalho. A partir dos dados experimentais obtidos com água filtrada, é ainda estimada uma expressão correspondente ao fator de atrito em função de número de Reynolds da bancada experimental, que é utilizada posteriormente para o cálculo de percentual de *DR* com as diferentes soluções. Dessa forma, o fator de atrito da bancada é então expresso por:

$$f_{bancada} = 0,1346 * Re^{-0,173}. \quad (7)$$

Com o objetivo de se avaliar a reprodutibilidade dos resultados, dois teste são realizados com soluções diferentes em mesma concentração de aditivo. Dessa forma, soluções em concentração de 400 ppm de pó de quiabo de mesma safra são testadas na bancada, impulsionadas pela bomba centrífuga em rotação constante de 3000 rpm. Os testes são executados em períodos diferentes do dia (manhã e tarde) para avaliar também a influência da pequena variação de temperatura ambiente decorrente ao longo do dia.

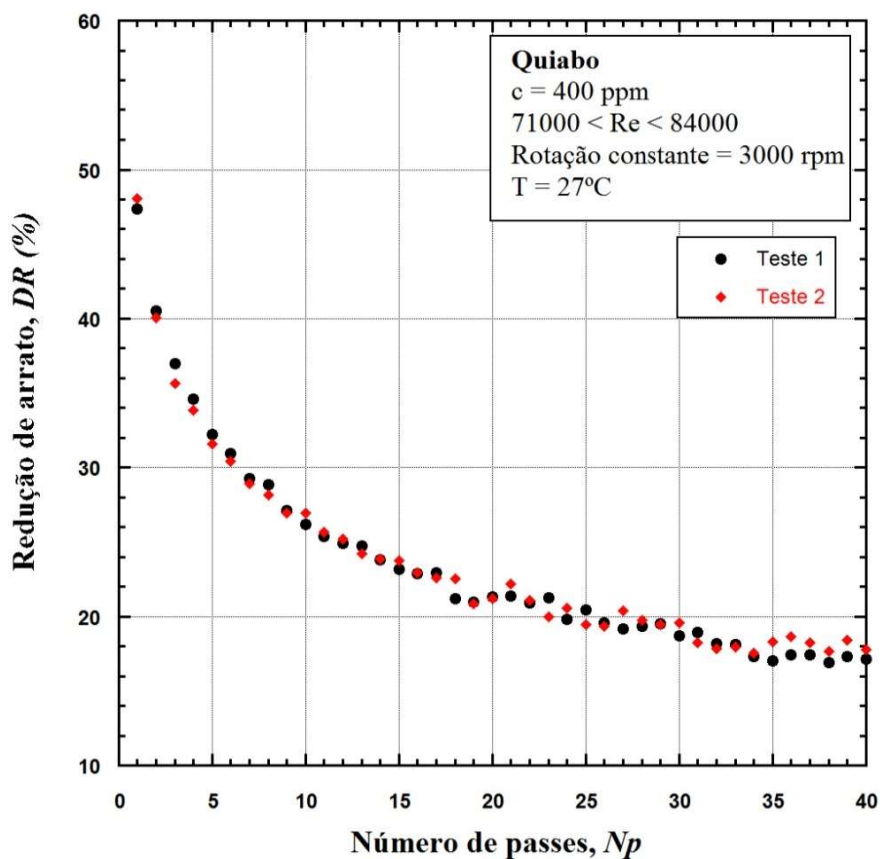
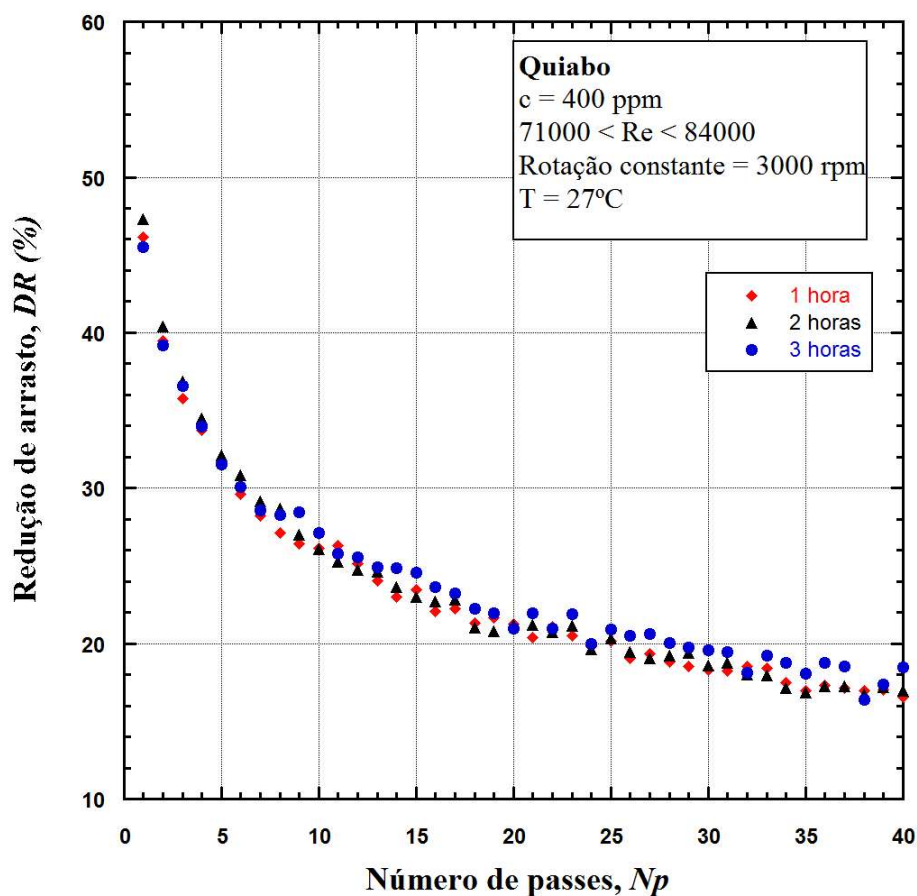


Figura 3.2 – Teste de repetitividade.

Os resultados dos testes de reprodutibilidade estão representados na Figura 3.2, que mostra o percentual de redução de arrasto em função do número de passes realizados na bancada com as soluções. Observando o gráfico, percebe-se que os resultados são muito próximos para ambos os testes, apresentando uma variação máxima entre pontos de 1,4% de redução de arrasto, ocorrido no passe de número 18 e, dessa forma, indicando boa repetitividade dos testes.

### 3.1.2 Tempo de diluição

O tempo necessário para a diluição da solução é analisado realizando testes de redução de arrasto na bancada experimental com soluções de mesma concentração e diferentes tempos de diluição. Para esta análise foi utilizada a concentração de 400 ppm.



**Figura 3.3 – Análise do tempo de diluição.**

A Figura 3.3 mostra os resultados em variação percentual de redução de arrasto com número de passe para os tempos estudados para a diluição da amostra, sendo estes, 1, 2, e 3 horas. Percebe-se que não houve variação significativa entre os testes, levando em consideração a precisão do experimento, ocorrendo uma variação máxima de 2% em  $DR$  entre os pontos. Como pode ser observado, o pó de quiabo apresenta bons resultados com apenas 1 hora de diluição para a concentração de 400ppm, atingindo um valor máximo de redução de arrasto de aproximadamente 56% e assintótico próximo a 17%. Avaliações preliminares a esse teste mostraram ainda que em aproximadamente 8 horas de armazenamento para diluição, a amostra apresenta pequenas bolhas e variação de odor perceptível, sugerindo um processo inicial de decomposição do material. Devido a esse fato e aos resultados consistentes obtidos para os tempos estudados, não são realizados testes com tempo mais elevado. Por fim, apesar de 1 hora se mostrar suficiente, para este trabalho é utilizado o tempo de 2 horas para diluição das soluções de estudo, por maior confiabilidade e

devido ao fato de concentrações mais elevadas serem estudadas, com exceção da concentração de 1600 ppm onde o tempo utilizado é ainda maior (3 horas).

### **3.2 Influências da concentração na redução de arrasto absoluta.**

Os testes para análise do efeito da concentração são realizados para cinco concentrações diferentes, compreendendo uma faixa de 100 a 1600 ppm, como pode ser observado na Figura 3.4. Nesse experimento, o escoamento é impulsionado pela bomba centrífuga, com rotação constante de 3000 rpm, e o teste é realizado em temperatura média de aproximadamente 27 °C. Para cada teste são realizados de 30 a 50 passes dependendo da concentração. Como esperado para redução de arrasto através da adição de polímeros, a redução aumenta com o aumento da concentração, fato observado para diversos polímeros por Lumley (1973), Virk (1975) e Vanapalli, Islam e Solomon. (2005) e, em particular para o polímero natural do quiabo, por Abdubari, Ahmad e Yunus (2010), Abdubari, Kamarulizam, Man (2011), e Abdulbari, Kamarulizam e Nour (2012). Os resultados observados para cada concentração partem de uma máxima redução de arrasto,  $DR_{máx}$ , ocorrida no primeiro passe, e decresce a cada passe realizado, em resposta a desagregação das cadeias moleculares dos polímeros durante o escoamento. Acredita-se que a perda de eficiência desse material não é causada pela degradação mecânica, uma vez que as fibras e os polímeros utilizados são considerados rígidos. É conhecido que biopolímeros como a Goma Xantana e a Goma Guar são polímeros rígidos e, conseqüentemente, não degradam mecanicamente. O polímero extraído do quiabo é similar a esses materiais e as fibras são ainda mais resistentes. Dessa forma, não é esperado observar degradação mecânica nos testes com esse material, composto de fibras e polímeros do quiabo. Assim, a perda de eficiência observada deve ser causada por outro fenômeno, como a desagregação das cadeias poliméricas, como reportado por Soares *et al.* (2015) em seus estudos com Goma Xantana.

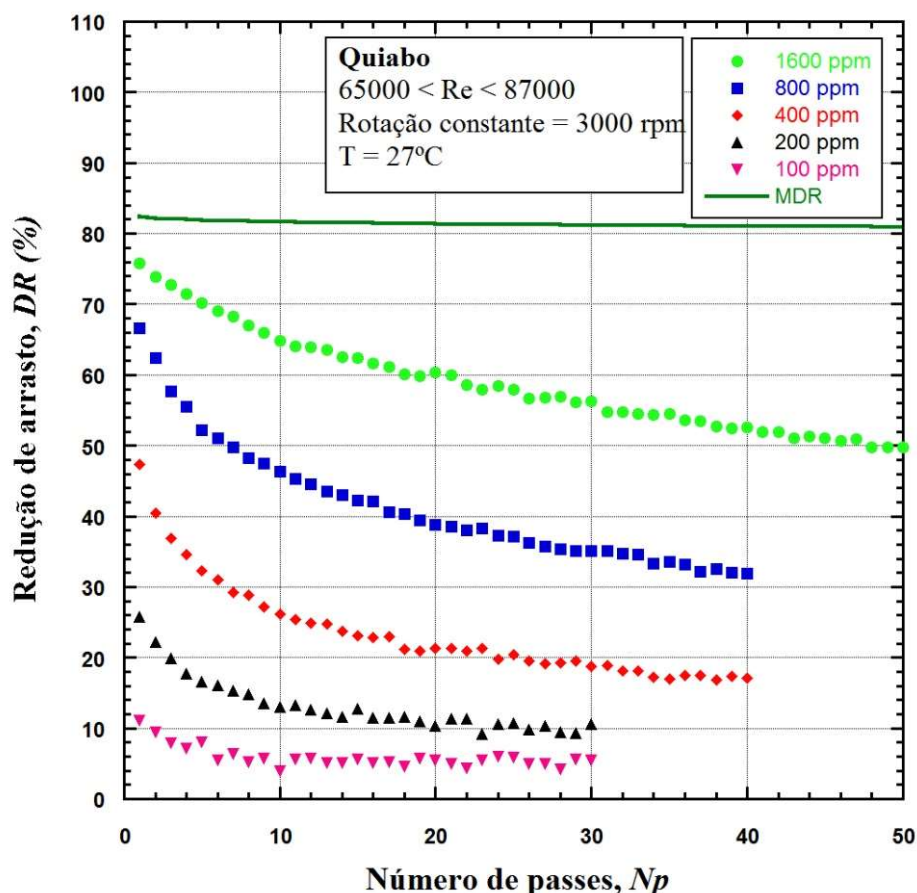


Figura 3.4 – Efeito da concentração na redução de arrasto em função do número de passes.

Ainda na Figura 3.4, analisando  $DR_{máx}$ , com o incremento da concentração observa-se a aproximação de  $DR_{máx}$  com curva de MDR ou assíntota de Virk, tornando essa redução inicial menos sensível a variação da concentração assim como observado por Virk, Mickley e Smith. (1967) como uma característica de redução de arrasto por polímeros. Apesar da redução de arrasto do pó de quiabo ser proporcionada pela soma das influências de fibras e polímeros, neste trabalho não é alcançado um valor superior ao limite estabelecido por Virk (MDR) para redução por polímeros. A máxima redução de arrasto observada é de aproximadamente 76% para a concentração de 1600 ppm, correspondendo a uma boa aproximação à curva MDR, a qual se encontra na faixa de 80% a 85% de redução de arrasto. É importante salientar que o tempo de resistência,  $t_r$ , termo introduzido por Pereira e Soares (2012) que representa o período em que os polímeros resistem em sua capacidade máxima de redução de arrasto, não é evidenciado para esse experimento, uma vez que o polímero, ao passar uma única vez pelo experimento, já sofre um processo de desagregação parcial, causado pela

intensa turbulência estabelecida no escoamento e altas taxas de cisalhamento na região do rotor da bomba. Outro ponto de interesse a ser observada é o valor assintótico,  $DR_{assint}$ , obtido nos passes finais para cada concentração estudada, onde, após o processo de desagregação ocorrido por diversos passes realizados, o valor de  $DR$  tende a se tornar fixo e independente do  $Np$ . Esse fenômeno ocorre devido a diminuição do comprimento molecular médio dos polímeros da solução até um valor constante, conforme explicado por Soares *et al.* (2015) para polímeros rígidos.

Na Figura 3.5 é apresentado isoladamente os valores máximos e assintóticos de  $DR$  obtidos nos teste de variação de concentração em função das concentrações correspondentes. Nessa figura, pode ser claramente observado na curva de  $DR_{máx}$ , que seus valores tornam-se cada vez menos sensíveis à variação da concentração à medida que a mesma é incrementada, tendendo a um limite máximo da capacidade do material em uma concentração crítica, na qual o aumento da concentração é incapaz de proporcionar ganhos de  $DR$  e acaba por prejudicar o processo com aumento excessivo da viscosidade. O  $DR_{assint}$  também apresenta crescimento com o aumento da concentração, de tal forma que, na concentração de 100 ppm encontra-se em 6%, em 200 ppm aumenta para 10%, em 400 ppm para 18% e assim sucessivamente, ou seja, ao dobrar a concentração não dobra-se o valor de  $DR_{assint}$ , caracterizando em um menor ganho de eficiência do material.



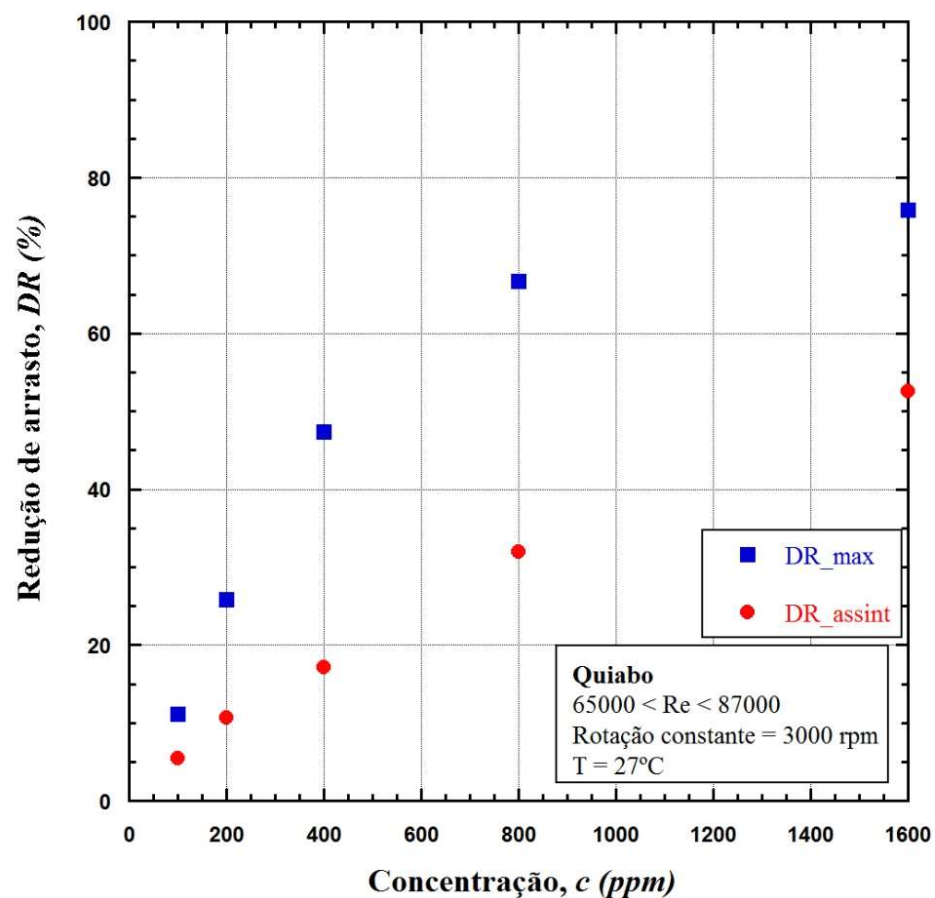


Figura 3.5 – Efeito da concentração na redução de arrasto máxima e assintótica.

### 3.2.1 Comportamento da vazão e queda de pressão através da seção de teste

Ao analisar a equação de perda de carga utilizada neste trabalho,  $\Delta p/\rho = f \frac{l \bar{u}^2}{D}$ , percebe-se que para o comprimento, diâmetro e massa específica constantes, os únicos parâmetros que influenciam no fator de atrito são, a queda de pressão e a velocidade média do escoamento, diretamente ligada à vazão que passa pela tubulação. No interesse de analisar o comportamento do material de um ponto de vista mais prático, os resultados obtidos para os testes de variação de concentração, Figura 3.4, são analisados novamente em termos de vazão e queda de pressão, uma vez que esses são os parâmetros de maior interesse nas indústrias.

As Figura 3.6 e Figura 3.7 apresentam, respectivamente, os comportamentos da vazão e da queda de pressão como função do número de passes através do aparato experimental para as diferentes concentrações estudadas. Obviamente, para uma rotação constante da bomba, o aditivo proporciona um ganho de vazão e uma diminuição na queda de pressão, comparados com o solvente, onde juntos representam o percentual de  $DR$  atingido e apresentado anteriormente (Figura 3.4). Como esperado, as diferenças de vazão e queda de pressão entre o solvente e a solução aumentam com o aumento da concentração e diminuem com  $Np$ . Esta diminuição da diferença com  $Np$  também está associada ao fenômeno de desagregação das moléculas ocorrido em cada passe. Esse fato está de acordo com o reportado por Pereira, Andrade e Soares (2013) Andrade, Pereira e Soares (2014, 2016), Soares e Sandoval (2015) e Sandoval e Soares (2016), que corroboram com a ideia de que a diminuição do comprimento médio molecular causada pela desagregação, nesse caso, afeta as propriedades do escoamento de forma global (fator de atrito, vazão e pressão).

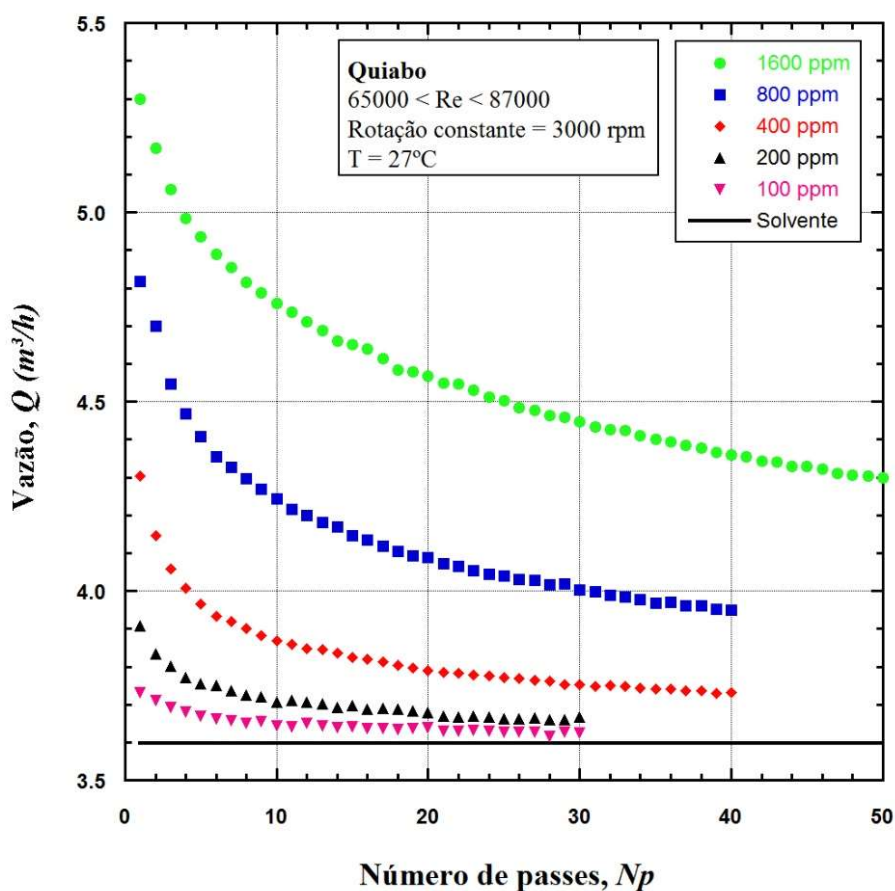


Figura 3.6 – Vazão em função do número de passes para diferentes concentrações.

Observando a Figura 3.6 isoladamente, ocorre um aumento na vazão com o aumento da concentração, sendo o valor máximo atingido de  $5,3 \text{ m}^3/\text{h}$  para o primeiro passe da solução de 1600 ppm, correspondendo ao ganho de  $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$  (48%) em relação ao solvente. Ainda para esta concentração, o valor assintótico obtido é de  $4,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , configurando uma queda de 18% após o processo de desagregação. Já para a concentração mais baixa, 100 ppm, os valores máximo e assintótico encontrados são de aproximadamente  $3,7 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , correspondendo a 3% de queda. Esses percentuais de máxima queda devido a desagregação para as soluções de 100 e 1600 ppm são os valores extremos encontrados para as concentrações estudadas. Esses valores indicam uma boa resistência do polímero em comparação aos polímeros flexíveis PEO e PAM, de acordo com os resultados reportados por Sandoval e Soares (2016). Os autores, utilizando o mesmo aparato experimental deste trabalho, mostram que para soluções em concentração de 200 ppm, as perdas causadas por degradação, no caso de polímeros flexíveis, correspondem a 26% e 19% para PEO e PAM respectivamente, mesmo que para um escoamento consideravelmente menos agressivo por ser impulsionado por ar comprimido e não sofrer a degradação localizada provocada pela bomba. Essa característica do polímero é uma vantagem quando se faz necessário o escoamento do fluido por um longo percurso, apresentando pouca variação na vazão.

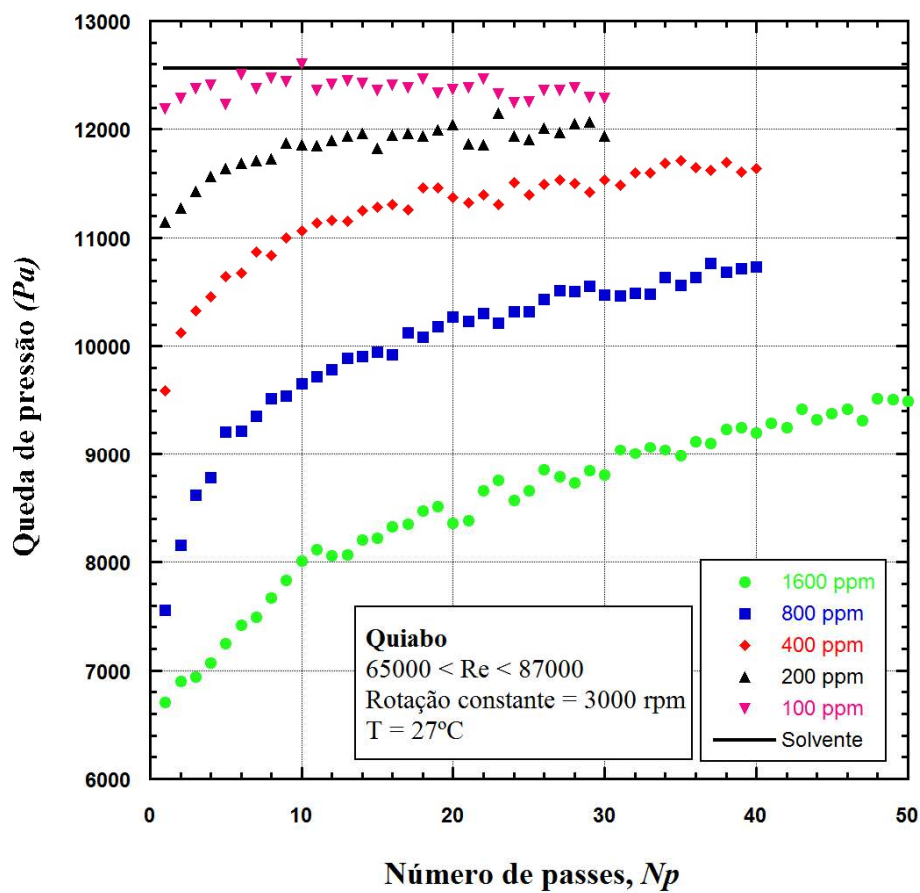


Figura 3.7 – Queda de pressão em função do número de passes para diferentes concentrações.

Analisando agora somente a Figura 3.7, pode ser observado que a queda de pressão diminui com o aumento da concentração e aumenta com  $Np$ . A queda de pressão se apresenta 47% menor (5900 Pa) para a concentração de 1600 ppm em comparação ao solvente no primeiro passe. Essa queda corresponde à um ganho na pressão de operação de um sistema. Comparando aos valores assintóticos (9500 Pa) com 1600 ppm, é observado uma variação de 3600 Pa (38%) causado pelo fenômeno de desagregação. Já a menor concentração estudada, 100 ppm, aparentemente apresenta valores constantes de queda de pressão, porém muito próximos aos dos solvente.

### 3.3 Redução de arrasto relativa

Nesta seção é apresentada uma análise da eficiência em resistência da solução em função do aumento da concentração e número de passes. Para esta análise os valores de  $DR$  obtidos nos testes de variação de concentração (Figura 3.4) são divididos pelo  $DR_{máx}$  de sua respectiva concentração, obtendo-se assim uma curva de redução de arrasto relativa ( $DR'$ ), onde  $DR' = DR(Np)/DR_{máx}$ . Os valores de  $DR'$  variam de 0 a 1 e cada curva de concentração inicia-se com o valor máximo de 1 ( $DR'_{máx}$ ) e termina com seu respectivo valor assintótico ( $DR'_{assint}$ ). Dessa forma, fazendo a diferença  $1 - DR'_{assint}$  pode ser avaliada a máxima perda de eficiência em redução de arrasto causada pela desagregação do polímero ocorrida no escoamento.

A Figura 3.8 mostra os resultados obtidos de  $DR'$  em função do número de passes para as diferentes concentrações estudadas.

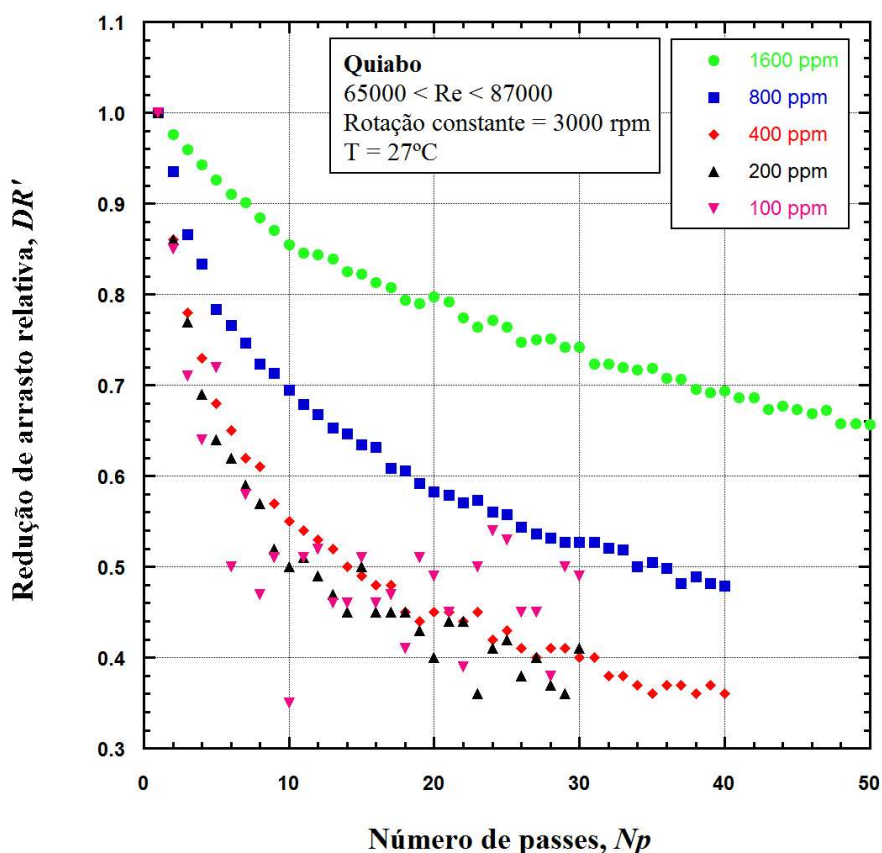


Figura 3.8 – Degradação da solução de quiabo em função do número de passes para diferentes concentrações.

Observando a Figura 3.8, para as concentrações mais elevadas (400, 800 e 1600 ppm), a eficiência da solução em relação a desagregação claramente tende a aumentar com o aumento da concentração. Avaliando em conjunto agora as baixas concentrações (100, 200 e 400 ppm), percebe-se um comportamento ligeiramente diferente dos normalmente encontrados para polímeros flexíveis como PEO e PAM. Para tais polímeros, o valor de  $DR'_{assint}$  aumenta com o aumento da concentração. O caso da concentração de 200 ppm apresenta resultado muito semelhante ao encontrado para 400 ppm, sem caracterizar um aumento de eficiência com o aumento da concentração. Agora observando a concentração de 100 ppm, apesar da dispersão dos dados, percebe-se a maior parte de seus pontos superiores aos valores obtidos para a concentração de 200 ppm na região assintótica, caracterizando uma melhor eficiência para uma menor concentração. Esse mesmo fato é observado por Soares *et al.* (2015) para Goma Xantana em comparação com os polímeros flexíveis PEO e PAM, indicando ser uma característica de polímeros rígidos a presença de um ponto de inflexão no comportamento da eficiência da resistência do polímero. Porém, apesar do indício, isso não é conclusivo neste presente trabalho, uma vez que a solução possui, juntamente com os polímeros, a presença de fibras.

### 3.4 Efeitos da degradação biológica

Em contra partida ao fato dos polímeros naturais e fibras possuírem alta resistência mecânica, eles são altamente suscetíveis a degradação biológica e esse fato requer atenção em sua utilização. Nesta seção são apresentados os resultados do efeito da degradação biológica em função do período em que uma solução é estocada.

A Figura 3.9 apresenta os valores do percentual de  $DR$  em função no número de passes obtidos para uma mesma solução de 1600 ppm em diferentes períodos de estocagem, variando de 1 a 7 dias, as quais são realizadas após um teste inicial, onde ocorre a perda de eficiência devido à desagregação dos polímeros da solução.

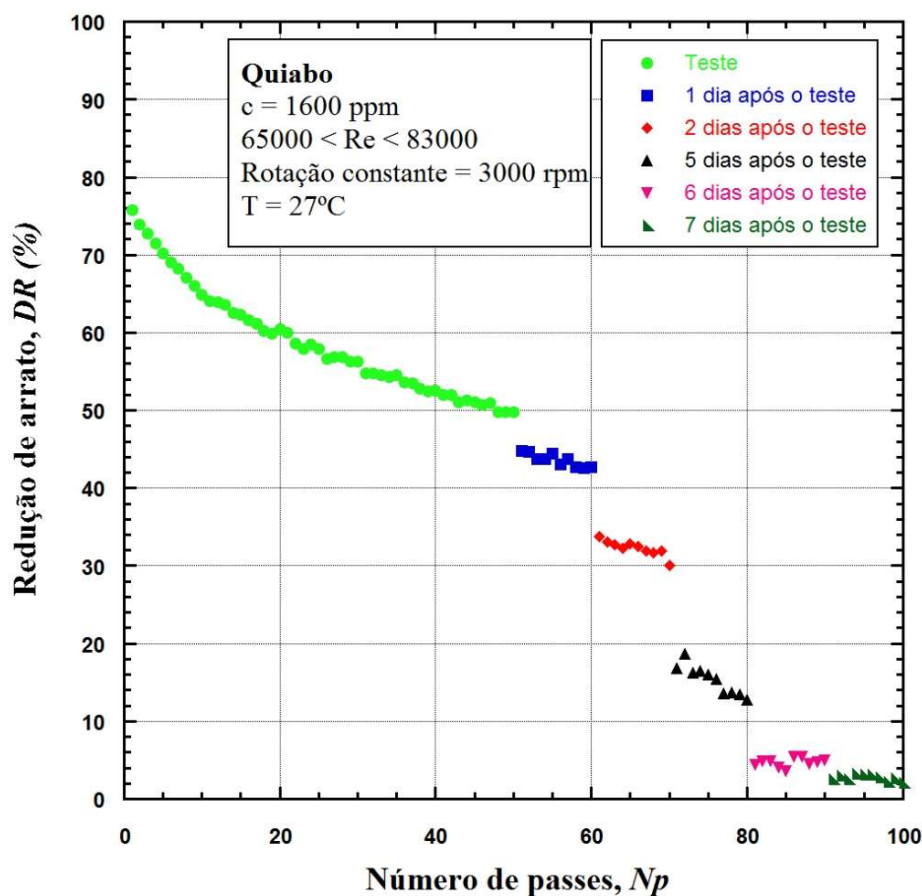


Figura 3.9 – Efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto.

Analisando a Figura 3.9, percebe-se claramente que a degradação biológica apresenta uma grande influência no percentual de redução de arrasto, evidenciado pelos saltos ocorridos entre os valores obtidos antes e após cada período de estocagem. Após um dia de estocagem uma queda de 7% de  $DR$  é observada em relação ao valor assintótico da solução inicialmente testada. Em sequência, essa queda aumenta para 18% e 37% no segundo e quinto dias respectivamente. Por fim, a partir do sexto dia, a solução é comprometida por completo, em termos de capacidade de redução de arrasto, apresentando valores próximos a zero. A degradação biológica, apesar de influenciar consideravelmente a capacidade de redução de arrasto, pode ser minimizada com uso de bactericidas. Contudo, em processos que ocorrem em menos de 24h, o uso de tal substância aparenta não ser necessário.

### 3.5 Efeitos da fibra

Nesta seção o efeito da presença de fibras na solução sobre a capacidade de redução de arrasto do aditivo é avaliado. A Figura 3.10 apresenta os valores de percentual de  $DR$  em função do número de passes para duas soluções de mesma concentração (350 ppm). Uma é composta apenas por mucilagem (solução aquosa de polímeros de quiabo) e a outra é composta por mucilagem e fibras.

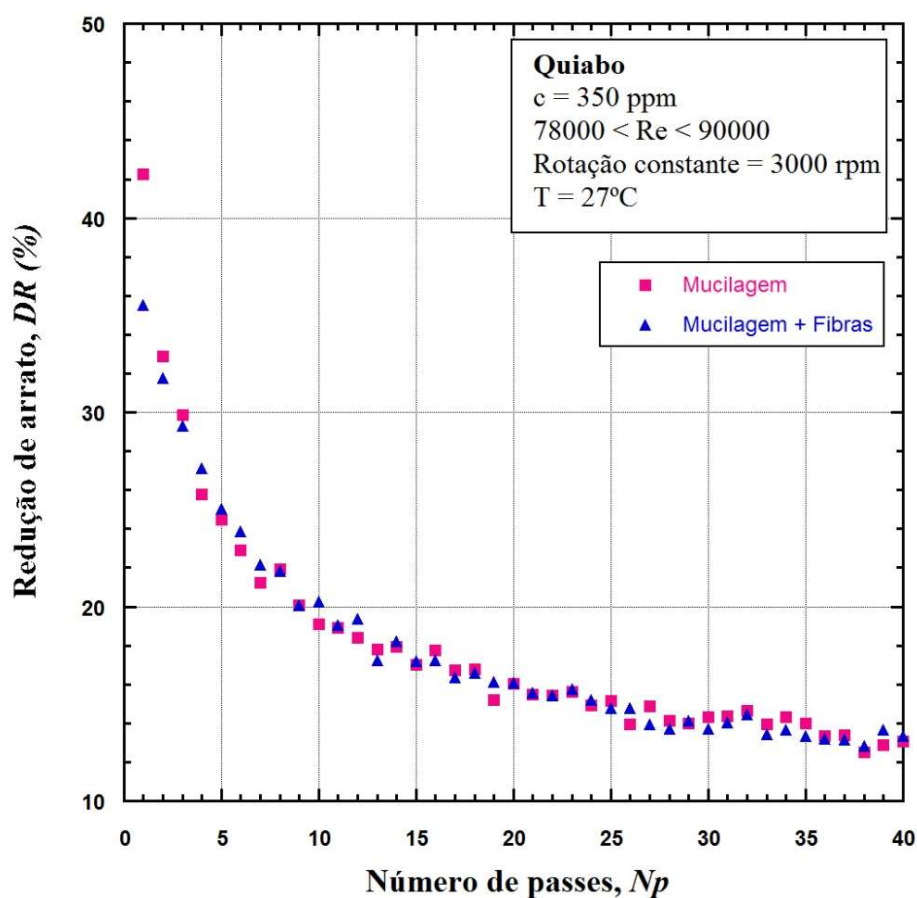


Figura 3.10 – Comparação entre soluções com e sem fibras.

Pode ser observado em ambos os testes, com e sem fibras, que os resultados se apresentaram muito próximos, indicando que a mucilagem pura e a mistura de mucilagem e fibras possuem eficiência semelhante em relação à capacidade de redução de arrasto para esta concentração. Devido aos testes serem realizados com apenas uma concentração, tal resultado não é conclusivo e deve ser melhor investigado. Porém, traz um ideia de comportamento onde não se espera grandes

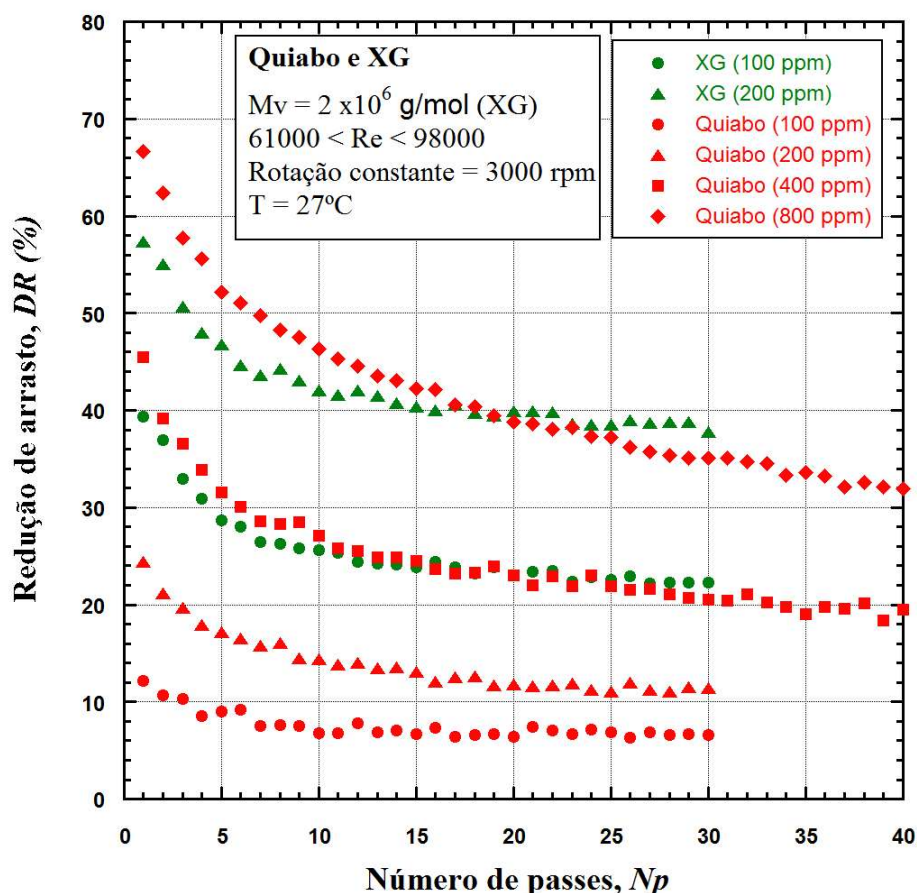


variações de redução de arrasto em concentrações próximas de 350 ppm. Considerando que no teste com mucilagem e fibras a maior parte da massa do material que constitui a concentração de 350 ppm sejam fibras, esse fato é positivo, pois as fibras são baratas e fáceis de se obter. Assim, tal evidência é positiva para aplicações práticas onde a presença de fibras é permitida.

### **3.6 Comparação entre quiabo, Goma Xantana (XG) e Óxido de Polietileno (PEO)**

Com o propósito de comparar a capacidade de redução de arrasto obtida pelos polímeros e fibras do quiabo com outros polímeros, natural e artificial, são realizados testes, seguindo o mesmo procedimento realizado para o quiabo, com a Goma Xantana e o Óxido de Polietileno. Uma única diferença está presente no preparo da amostra. Para as soluções de PEO, o tempo de diluição é de 72 h em uma temperatura controlada de 20 °C, semelhante ao procedimento utilizado por Soares *et al.* (2015) e Sandoval e Soares (2016). Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados encontrados em tais testes.

A Figura 3.11 apresenta os valores de *DR* em função do número de passes para o pó de quiabo, já mostrados anteriormente, e Goma Xantana nas concentrações de 100 e 200 ppm, cuja massa molecular é de  $2 \times 10^6$  g/mol.



**Figura 3.11 – Comparação entre quiabo e Goma Xantana em relação à capacidade de redução de arrasto.**

Pode ser observado na Figura 3.11 que ambos os polímeros apresentam comportamentos semelhantes em termos de resistência à desagregação em função do número de passes. Isso ocorre devido ao fato de ambos serem polímeros rígidos. Observando as curvas de 100 e 200 ppm de ambos os materiais, percebe-se que a XG apresenta uma melhor capacidade de redução de arrasto quando comparado ao quiabo em mesma concentração. Para 100 ppm, o quiabo apresenta 6,5% no valor de  $DR_{assint}$  enquanto a XG apresenta 22%, sendo assim, 16% superior ao valor encontrado para o quiabo. A mesma análise para a concentração de 200 ppm, mostra os valores de 11% e 38% para quiabo e XG respectivamente, sendo a XG 27% superior ao valor encontrado para o quiabo em termos de percentual de  $DR$ .

Os valores das curvas obtidas para 400 e 800 ppm de quiabo estão muito próximas às obtidas para 100 e 200 ppm, respectivamente, de Goma Xantana, o que leva a crer que a Goma Xantana apresenta uma relação de eficiência do material de 4 vezes

maior que o quiabo. Por outro lado, o quiabo como agente redutor possui um custo muito inferior que a XG, com produção simples e matéria prima abundante em diversas regiões.

A Figura 3.12 apresenta novamente os valores de  $DR$  em função do número de passes para pó de quiabo, desta vez em relação aos obtidos para PEO de massa molecular igual a  $4 \times 10^6$  g/mol, nas concentrações de 100 e 200 ppm,

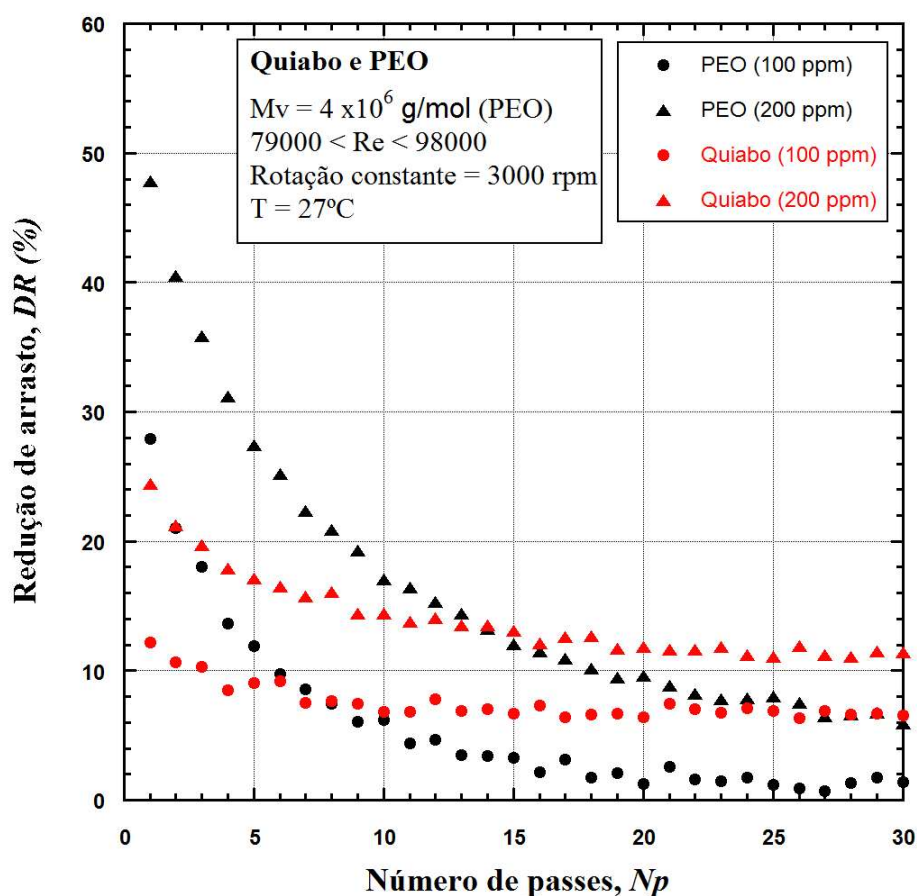


Figura 3.12 – Comparação entre quiabo e PEO em relação a capacidade de redução de arrasto.

Analisando os resultados da Figura 3.12, percebe-se claramente que a PEO possui maior capacidade de redução de arrasto inicial em comparação ao quiabo, e isso se inverte após um certo número de passes (6 passes para 100 ppm e 14 passes para 200 ppm). Tal ocorrência está relacionada aos comportamentos distintos dos polímeros rígidos e flexíveis. PEO, que é um polímero flexível, apesar da alta capacidade em redução de arrasto inicial, é mais suscetível a degradação polimérica. Essa baixa resistência característica dos polímeros flexíveis faz com que o valor

assintótico de  $DR$  obtido para PEO seja muito inferior ao inicialmente encontrado para a mesma curva de concentração, em comparação ao quiabo. Dessa forma, apesar de  $DR_{máx}$  elevado obtido para o PEO, a solução de quiabo se sobressai nos valores assintóticos, sendo superiores quando comparados em mesma concentração. É interessante observar que a solução de PEO na concentração de 100 ppm atinge valores assintóticos muito próximos a zero, isso ressalta a importância dos polímeros rígidos em aplicações em escoamentos com elevadas tensões de cisalhamento.

### 3.7 Mistura de polímeros

Com o objetivo de se avaliar um possível efeito sinérgico entre os materiais, fato já observado e relatado por muitos autores como, Lee, Vaseleski e Metzner (1974), Dingilian e Ruckenstein (1974), Dschagarowa e Bochossian (1978) Reddy e Singh (1985) Steele, Bayer e Loth (2014) e Sandoval e Soares (2016), soluções com misturas de quiabo e PEO são testadas na bancada, conforme procedimento utilizado para os mesmos de forma independente.

A Figura 3.13 mostra os resultados obtidos para a mistura de polímeros na concentração de 200 ppm (100 ppm de PEO mais 100 ppm de Quiabo), juntamente com os dados já mostrados anteriormente e obtidos para os polímeros de forma individual. Pode ser observado que a mistura de polímeros resultou em um aumento na capacidade de redução de arrasto, quando comparado com polímeros individuais em mesma concentração.

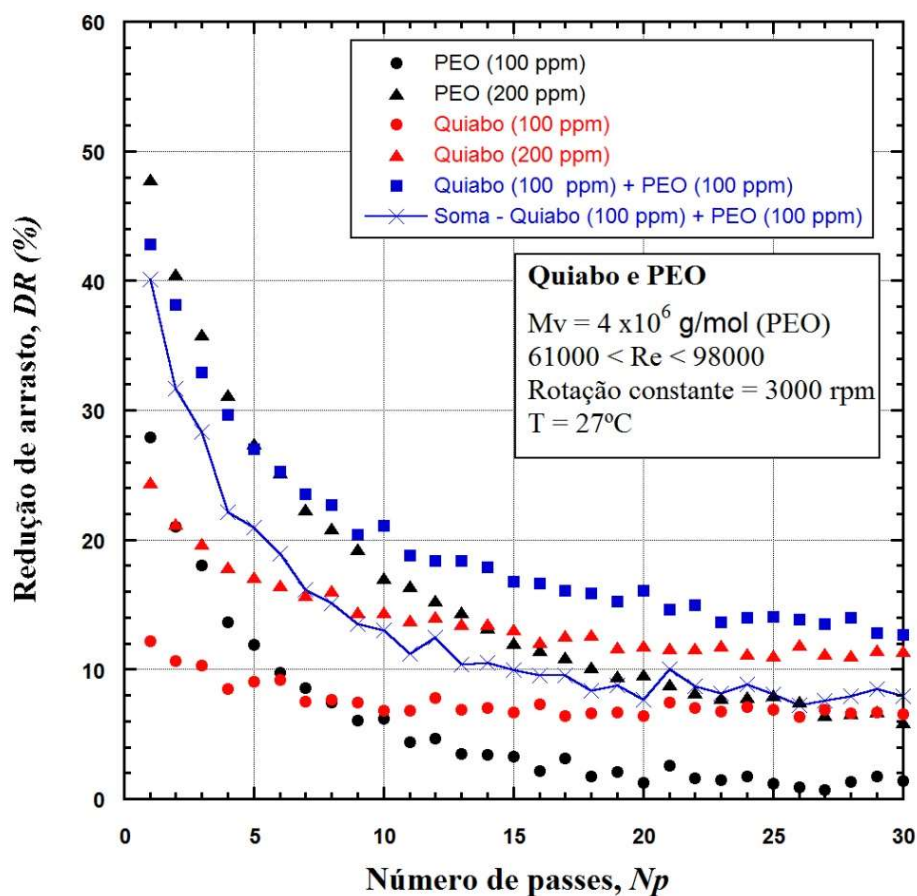


Figura 3.13 – Mistura de Quiabo e PEO em concentração de 200 ppm.

Ainda em relação à Figura 3.13, comparando a curva da mistura com os resultados para quiabo em 200 ppm, apesar da mistura se mostrar superior em toda a curva, essa melhoria é mais evidente e significativa nos primeiros passes, onde os valores de  $DR_{m\acute{a}x}$  são 43% para as soluções de mistura e 24% para as soluções de quiabo puro, mostrando um ganho em 19% de  $DR$ . Já na região assintótica os valores são muito próximos para estas curvas. Fazendo a mesma comparação, utilizando os dados obtidos para soluções de mistura e de PEO em 200 ppm, verifica-se um resultado muito próximo nos primeiros passes para ambos, onde, desta vez, o ganho é cada vez mais evidente à medida que são realizados os passes, onde, por fim, o  $DR_{assint}$  obtido é de 13% para a mistura e 6% para o PEO isolado, apresentando um ganho de 7%. A curva obtida para a mistura na concentração de 200 ppm apresenta resultado superior em todos os pontos quando comparada a soma dos resultados de duas soluções de 100 ppm com os polímeros individuais. Isso é um fato interessante, pois sabe-se que, a partir de uma solução de um polímero individual, ao dobrar a

concentração da solução é obtido uma resposta proporcionalmente inferior para a redução de arrasto. Esse fato é conhecido como sinergia positiva, conforme descrito e mostrado por Sandoval e Soares (2016).

Analisando agora a Figura 3.14, temos o mesmo gráfico comparativo apresentado na Figura 3.13, porém, para a concentração da solução de mistura de 400 ppm (200 ppm de PEO mais 200 ppm de quiabo). Para essa concentração, são percebidas melhorias semelhantes as obtidas para a concentração de mistura de 200 ppm. Assim, a mistura claramente apresenta ganhos nos primeiros passes e semelhança nos últimos passes, quando em comparação ao quiabo puro, e ganhos na região assintótica e semelhança nos primeiros passes, quando em comparação ao PEO puro, todos em mesmas concentrações de 400 ppm. Em valores, nessa concentração de 400 ppm, o aumento do  $DR_{máx}$  é de 12% em relação ao quiabo puro, e o aumento do  $DR_{assint}$  é de 9% em relação ao PEO puro.

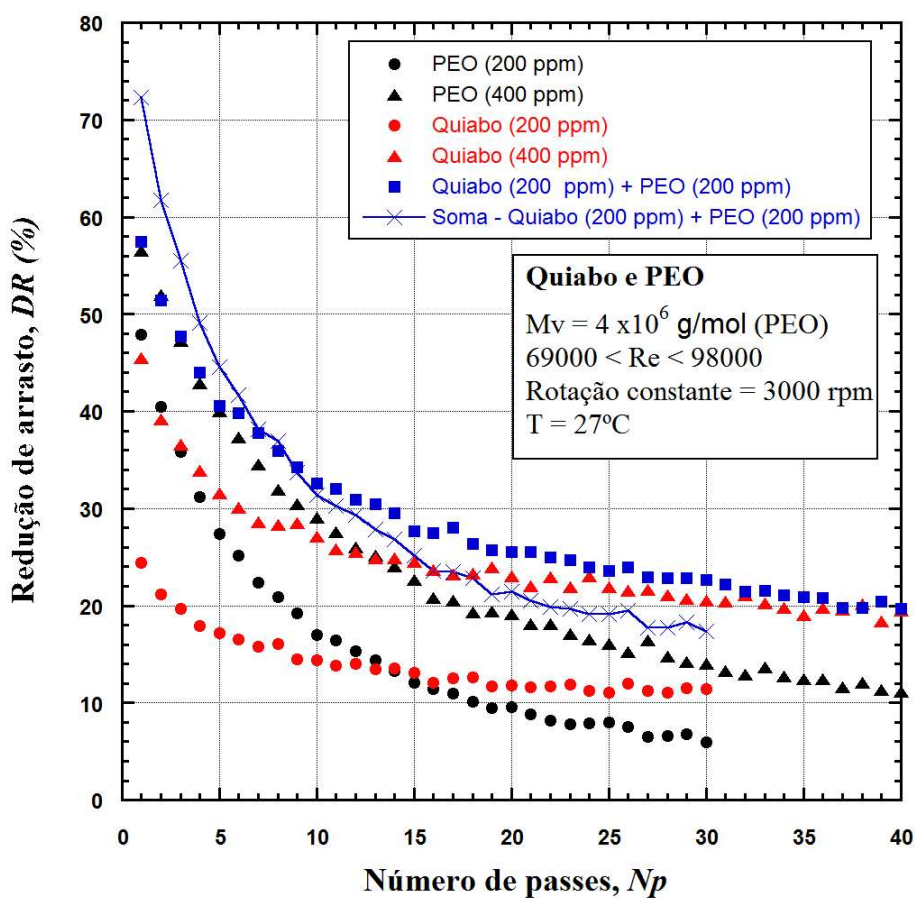


Figura 3.14 – Mistura de Quiabo e PEO em concentração de 400 ppm.

Concluindo a análise das Figura 3.13 e Figura 3.14, as soluções com as misturas dos materiais, quiabo e PEO, aparentam se beneficiar das melhores características de ambos em termos de redução de arrasto, sendo a boa capacidade de redução de arrasto provida pelo polímero flexível PEO, e a boa resistência, característica dos polímeros rígidos, encontrada no quiabo. Os efeitos sinérgicos encontrados com mistura de polímeros neste trabalho estão de acordo com os resultados encontrados por Sandoval e Soares (2016). Os autores analisam soluções de misturas de XG (polímero rígido) e PEO (polímero flexível) obtendo comportamentos qualitativamente semelhantes. O efeito sinérgico dos polímeros parece estar associado a uma indução à mudança na conformação das moléculas quando dispostas juntamente em um mesmo solvente, tornado a molécula flexível mais estendida, como argumentado por alguns autores como Mohsenipour e Pal (2013), Steele, Bayer e Loth (2014). Outra hipótese levanta seria a formação de agregados entre as moléculas (interconexão de algumas moléculas), como argumentado por Sandoval e Soares (2016), fenômeno observado por Shetty e Solomon (2009) entre moléculas de PEO, até mesmo em soluções de baixas concentrações. Ambas as hipóteses concordam que a melhoria dos resultados está associada com o aumento do comprimento médio molecular da solução, assim como o aumento da resistência dessas, sejam proporcionados pela conformação das moléculas flexíveis ou pela agregação dos materiais, de acordo com Dingilian e Ruckenstein (1974) e Reddy e Singh (1985). Esses autores, juntamente com Sandoval e Soares (2016), percebem ainda que o efeito sinérgico parece prevalecer positivamente quando a combinação de materiais é feita entre polímeros rígidos e flexíveis, o que está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho.

## CAPÍTULO 4

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estuda-se aqui o comportamento da redução de arrasto dos polímeros e fibras encontrados no quiabo como um novo agente natural redutor de arrasto. Devido ao material de estudo não ser comercialmente encontrado na forma adequada para a utilização como agente redutor, um método de processamento da fruta foi desenvolvido para a obtenção de um pó, composto por fibras e polímeros naturais do quiabo, com granulometria controlada. A técnica de Ressonância Magnética Nuclear de Carbono 13 foi usada para analisar a composição química desse pó. E uma análise reológica simples mostrou um comportamento de fluido afinante para as soluções usadas neste trabalho

Testes preliminares foram conduzidos para avaliar a confiabilidade das medições. Uma comparação dos resultados encontrados na bancada para o fator de atrito utilizando água filtrada é feita com a correlação de Blasius, resultando em uma variação máxima de 3%, um bom resultado para os propósitos do estudo. Outros testes, também foram realizados, mostrando boa repetitividade de resultados.

Como resultados principais, é observado que os valores de  $DR$  aumentam com o aumento da concentração e diminuem com  $Np$ . Nesses resultados um valor 76% de  $DR$  é encontrado para a concentração de 1600 ppm, que corresponde a um valor próximo a assíntota de Virk. De modo geral, os resultados demonstram uma boa capacidade de redução de arrasto para o material. Devido ao material estudado ser biodegradável, o efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto foi avaliado. Constata-se um forte efeito da degradação nos valores de  $DR$  comprometendo por completo a capacidade de redução depois de 6 dias, nas condições impostas no teste. O efeito da presença da fibra na composição do material redutor é avaliado e são encontrados resultados similares para soluções com e sem a presença de fibras, na mesma concentração (350 ppm).



Comparações com outros polímeros são realizadas para as mesmas condições de teste. Testes de comparação com outro polímero natural, Goma Xantana, mostram comportamentos semelhantes entre os materiais, em relação ao processo de desagregação, onde ambos demonstram boa resistência, característica dos polímeros rígidos. Comparando a capacidade de redução, os resultados sugerem que a Goma Xantana é 4 vezes mais eficiente que o quiabo, porém é um material de maior custo. Outra comparação, com o polímero flexível óxido de polietileno, deixa evidente as vantagens do quiabo quanto a resistência à perda de eficiência ao longo do escoamento, como esperado de um polissacarídeo rígido. Por fim, testes são conduzidos com misturas dos polímeros e fibras do quiabo com Óxido de Polietileno. Interessantes resultados de sinergia entre os materiais foram observados. De fato, soluções de misturas apresentaram maior eficiência como agente redutor em comparação com soluções dos polímeros independentes em mesma concentração.

Em face dos resultados obtidos, o material de mistura de fibras e polímeros do quiabo demonstrou ser um bom agente redutor de arrasto, sendo capaz de promover satisfatória redução em escoamentos turbulentos em tubulações, com as vantagens de ser um material natural, facilmente biodegradável e com maior resistência à perda de eficiência em comparação aos polímeros sintéticos flexíveis. A matéria prima é relativamente barata, abundante no Brasil, e o processamento para a utilização é simples, sendo assim, um agente de baixo custo e acessível. Além de seus resultados satisfatórios, sendo um material natural, pode ser utilizado em aplicações em contato com o meio ambiente e é um melhor candidato para aplicações na área da medicina. Os resultados apresentados neste trabalho foram publicados no *Journal Rheologica Acta* (Coelho *et al.*, 2016) e ainda foi depositado um pedido de patente sobre o material estudado (Soares *et al.*, 2016).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdulbari, H. A., Ahmad M. A. e Yunus R. B. M. "Formulation of okra-natural mucilage as drag reducing agent in different size of galvanized Iron pipes in turbulent water flowing system", *Journal of Applied Sciences*, vol. 10, pp. 3105-3110, 2010.
- [2] Abdulbari, H. A., Kamarulizam, S. N. e Man, R. C. "Investigating drag reduction characteristic using Okra Mucilage as new drag reduction agent", *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, pp. 2554-2561, 2011.
- [3] Abdulbari, H. A., Kamarulizam, N. S. e Nour, A. H. "Grafted natural polymer as new drag reducing agent: An experimental approach", *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 18, pp. 361-371, 2012.
- [4] Abdulbari, H. A., Shabirin, A. e Abdurrahman, H. N. "Bio-polymers for improving liquid flow in pipelines - A review and future work opportunities", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 1157-1170, 2014.
- [5] Andrade, R. M., Pereira, A. S. e 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.
- [6] Andrade, R. M., Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Drag reduction in synthetic seawater by flexible and rigid polymer addition into a rotating cylindrical double gap device", *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 138, pp. 021101-1-021101-10, 2016.
- [7] Bewersdorff, H. W. e Berman, N. S. "The influence of flow-induced non-Newtonian fluid properties on turbulent drag reduction", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 130-136, 1988.
- [8] Bewersdorff, H. W. e Singh, R. P. "Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 617-627, 1988.
- [9] Burger, E. D. e Chorn, L. G. "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing prudhoe bay crude oil", *Journal of Rheology*, vol. 24, pp. 603-626, 1980.

- [10] Chen, X., Zha, D. Xiu, J., Liao, Y., Cui, K., Lin, H., Jian, Z., Hu, F., Huang, X., Zhou, B. e Huang, Q. "A new hydrodynamic approach by infusion of drag-reducing polymers to improve left ventricular function in rats with myocardial infarction", *International Journal of Cardiology*, vol. 147, pp. 112-117, 2011.
- [11] Coelho, E. C, Barbosa, K. C. O., Soares, E. J., Siqueira, R, N. e Freitas, J. C. C. "Okra as a drag reducer for high Reynolds numbers water flows", *Rheologica Acta*, vol. 55, pp. 983-991, 2016.
- [12] Dingilian, E. e Ruckenstein, E. "Positive and negative deviations from additivity in drag reduction of binary dilute polymer solutions", *AIChE Journal*, Vol. 20, pp. 1222-1224, 1974.
- [13] Dschagarowa, E. e Bochossian T. "Drag reduction in polymer mixtures", *Rheologica Acta*, vol. 17, pp. 426-432, 1978.
- [14] Dubief, Y., White, C. M., Terrapon, V. E., Shaqfeh, E. S. G., Moin, P. e Lele, K. "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 514, pp. 271-280, 2004.
- [15] Fabula, G. "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction", *Trans ASME Journal of Basic Engineering*, vol.93, pp. 453-455, 1971.
- [16] Figueredo, R. C. R. e Sabadini, E. "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide", *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, pp. 77-86, 2003.
- [17] Forrest, F. e Grierson, G. A. "Friction losses in cast iron pipe carrying paper stock", *Paper Trade Journal*, vol. 92, no. 22, pp. 39-41, 1931.
- [18] Gasljevic, K., Hall, K., Chapman, D. e Matthys, E. F. "Drag-reducing polysaccharides from marine microalgae: species productivity and drag reduction effectiveness", *Journal of Applied Phycology*, vol. 20, pp. 299-310, 2008.
- [19] Joseph, D. D. "Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids", New York: Springer Verlag, vol. 84, 1990.
- [20] Kameneva, M. V., Wu, Z. J., Uraysh, A., Repko, B., Litwak, K .N., Billiar, T. R., Fink, M. P. e Simmons, R. L. "Blood soluble drag-reducing polymers prevent lethality from hemorrhagic shock in acute animal experiments", *Biorheology*, vol. 41, pp. 53-64, 2004.

- [21] Kameneva, M. V. "Microrheological effects of drag-reducing polymers in vitro and in vivo", *International Journal of Engineering Science*, vol. 59, 168-183, 2012.
- [22] Kenis, P. R. "Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 15, p. 607-618, 1971.
- [23] L'vov, V. S., Pomyalov, A., Procaccia, I. e Tiberkevich, V. "Drag reduction by polymers in wall bounded turbulence", *Physical Review Letters*, vol. 92, pp. 244503-1-244503-4, 2004.
- [24] Larson, R. G. "Analysis of polymer turbulent drag reduction in flow past a flat plate. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*", vol. 111, pp. 229-250, 2003.
- [25] Lee, W. K., Vaseleski, R. C. e Metzner, A. B. "Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers", *AIChE Journal*, vol. 20, pp. 128-133, 1974.
- [26] Lee, C. S., Chong, M. F., Robinson, J., e Binner, E. "Optimisation of extraction and sludge dewatering efficiencies of bio-flocculants extracted from *Abelmoschus esculentus* (okra)", *Journal of environmental management*, vol. 157, pp. 320-325, 2015.
- [27] Lumley, J. L. "Drag reduction by additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 11, pp. 367-384, 1969.
- [28] Lumley, J. L. "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives", *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, vol. 7, pp. 263-290, 1973.
- [29] Merrill, E. W. e Horn, A. F. "Scission of macromolecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows", *Polymer Communications*, vol. 25, pp. 144-146, 1984.
- [30] Min, T. Yoo, J. Y., Choi, H. e Joseph, D. D. "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 486, pp. 213-238, 2004.
- [31] Mohsenipour, A. A. e Pal, R. "The role of surfactants in mechanical degradation of drag-reducing polymers", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, pp. 1291-1302, 2013.

- [32] Morris, E. R. "Molecular Origin of Xanthan Solution Properties", *Extracellular Microbial Polysaccharides*, ACS Symposium Series, Chapter 6, vol. 45, pp. 81-89, 1977.
- [33] Mostardi, R. A. Thomas, L. C., Greene, H. L., VanEssen, F. e Nokes, R. F "Suppression of atherosclerosis in rabbits using drag reducing polymers", *Biorheology*, vol. 15, pp. 1-14, 1978.
- [34] Müller, G., Anhourrache, M., Lecourtier, J., e Chauveteau, G. "Salt dependence of the conformation of a single-stranded xanthan", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 8, pp. 167-172, 1986.
- [35] Odell, J. A., Keller, A. e Miles, M. J. "A Method for Studying FlowInduced Polymer Degradations - Verification of Chain Halving", *Polymer Communication.*, vol. 24, pp. 7-10, 1983.
- [36] Ogata, S. e Warashina, J. "Drag Reduction of a Pipe Flow Using Nata de Coco Suspensions", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 651260-1-651260-8, 2014.
- [37] Paterson, R. W. e Abernathy, F. H. "Turbulent flow drag reduction and degradation with dilute polymer solutions", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 43, 689-710, 1970.
- [38] Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 179, pp. 9-22, 2012.
- [39] Pereira, A. S., Andrade, R. M. e 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.
- [40] Phukan, S., Kumar, P., Panda, J., Nayak, B. R., Tiwari, K. N. e Singh, R. P. "Application of drag reducing commercial and purified guar gum for reduction of energy requirement of sprinkler irrigation and percolation rate of the soil", *Agricultural Water Management*, vol. 47, pp. 101-118, 2001.

- [41] Ptasinski, P. K., Nieuwstadt, F. T. M., Van den Brule, B. H. A. A., e 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.
- [42] Reedy, G. V. e Singh R. P. "Drag reduction effectiveness and shear stability of polymer-polymer and polymer-fibre mixtures in recirculatory turbulent flow of water", *Rheologica Acta*, vol. 24, pp. 296-311, 1985.
- [43] Ryskin, G. "Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory", *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 2059-2062, 1987.
- [44] Sandoval, G. A. e Soares, E. J. "Effect of combined polymers on the loss of efficiency caused by mechanical degradation in drag reducing flows through straight tubes", *Rheologica Acta*, vol. 55, pp. 559-569, 2016.
- [45] Savins, J. G. "Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow", *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 4, pp. 203-204, 1964.
- [46] Shetty, A. M. e 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, 2009.
- [47] Singh, R. P., Singh, J., Deshmukh, S. R. e Kumar, A. "The effect of grafted and ungrafted guar gum on turbulent flow of water and on hydraulic conductivity of soil", *Proceedings of the IUTAM Symposium on the Influence of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields*, pp. 131-139, 1985.
- [48] Singh, H. K. G., Jaafar, A., e Yusup, S. "The Effect of Sodium Hydroxide on Drag Reduction using a Biopolymer", *MATEC Web of Conferences*, Vol. 13, pp. 0203-1-0203-5, 2014.
- [49] Soares, E. J., Sandoval, G. A., Silveira, L., Pereira, A. S., Trevelin, R., e Thomaz, F. "Loss of efficiency of polymeric drag reducers induced by high Reynolds number flows in tubes with imposed pressure", *Physics of Fluids*, vol. 27, pp. 125105-1-125105-23, 2015.
- [50] Soares, E. J., Siqueira, R. N., Coelho, E. C. e Barbosa, K. C. O. "Bio-redutor de arrasto a base de mucilagem e fibra de quiabo para escoamentos turbulentos em

duros”, Patente BR 10 2016 013995 3, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

- [51] Sohn, J. I., Kim, C. A., Choi, H. J. e Jhon, M. S. “Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 45, pp. 61-68, 2001.
- [52] Solomons, T. W., e Fryhle, C. B. “Química orgânica 2”, editora LTC, Vol. 2, ed. 7, 2006.
- [53] Sreenivasan K. R. e White C. M. “Analysis of polymer drag reduction on a flat plate”, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 409, pp. 149-164, 2000.
- [54] Steele, A., Bayer, I. S., e Loth, E. “Pipe flow drag reduction effects from carbon nanotube additives”, *Carbon*, vol. 77, pp. 1183-1186, 2014.
- [55] Tabor, M. e Gennes, P. G. D. “A cascade theory of drag reduction”, *Europhysics Letter*, vol. 7, pp. 519-522, 1986.
- [56] 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.
- [57] Unthank, J. L. S. G., Lalka, S. G., Nixon, J. C. e Sawchuk, A. P. “Improvement of flow through arterial stenoses by drag reducing agents”, *Journal of Surgical Research*, vol. 53, pp. 625-630, 1992.
- [58] Vanapalli, S. A., Islam, T. M., e Solomon, J. M. “Universal scaling for polymer chain scission in turbulence”, *Physics of Fluids*, vol. 17, pp. 1-11, 2005.
- [59] Virk, P. S., Mickley, H. S. e 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., e 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. “Drag reduction by collapsed and extended polyelectrolytes”, *Nature*, vol. 253, pp. 109-110, 1975.

- [62] Virk, P. S. "Drag reduction fundamentals", *AIChE Journal*, vol. 21, pp. 625-656, 1975.
- [63] Warholic, M. D., Massah, H., e 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. e 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] Wyatt, N. B., Gunther, C. M. e Liberatore, M. W. "Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, pp. 25-31, 2011.