

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

**DIOGO DE AZEVEDO LIMA**

**REDUÇÃO DE ARRASTO INDUZIDA POR POLÍMEROS EM ESCOAMENTO  
TURBULENTO DE ÁGUAS DE MANANCIAIS**

VITÓRIA  
2018

**DIOGO DE AZEVEDO LIMA**

**REDUÇÃO DE ARRASTO INDUZIDA POR POLÍMEROS EM ESCOAMENTO  
TURBULENTO DE ÁGUAS DE MANANCIAIS**

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  
2018

**DIOGO DE AZEVEDO LIMA**

**REDUÇÃO DE ARRASTO INDUZIDA POR POLÍMEROS EM ESCOAMENTO  
TURBULENTO DE ÁGUAS DE MANANCIAS**

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 28 de maio de 2018.

**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. Rodrigo Randow de Freitas – Examinador Externo**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro - Examinador Interno**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

"Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez."

Jean Cocteau



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, em primeiro lugar, e por me conceder saúde e sabedoria para conquistar os meus objetivos.

Agradeço a minha família por todo incentivo e apoio proporcionado, em especial a minha mãe, Neide Regina de Azevedo Lima, e aos meus avós, José Valter dos Santos Lima (*in memoriam*) e Maria da Penha de Azevedo Lima, que sempre torceram e oraram por minhas conquistas e sucesso.

Agradeço ao meu orientador, Renato do Nascimento Siqueira, e Coorientador, Edson José Soares, pela confiança, respeito e colaboração com o meu desenvolvimento, compartilhando conhecimentos e experiências.

Agradeço as pessoas e amigos da minha cidade natal por disponibilizar a matéria prima utilizada neste trabalho, em especial a minha namorada e a família Lozorio pela ajuda, companheirismo, atenção e paciência.

Agradeço também aos amigos do mestrado, Leandro Motta Leal, Alexandre Willig Quintino de Souza, Luiz Fernando Rambalducci Dalla e aos demais, por compartilharem conhecimentos e mostrarem sempre solícitos e dispostos na contribuição de conhecimento e companheirismo. Desejo bênção e sucesso a todos.

Agradeço a Faculdade Centro Leste (UCL) e aos colaboradores LFFT, Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transportes da UCL, pela parceria fundamental para realização deste projeto, em especial ao Lucas Antônio Silveira Silva e Michell Luiz Costalonga que sempre estiveram presentes me ajudando e auxiliando no desenvolvimento deste trabalho.

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

Por fim, agradeço ao Instituto Federal do Espírito Santo – IFES pela oportunidade de realizar este mestrado.

## RESUMO

É sabido que, na água sem particulados, o arrasto hidráulico pode ser reduzido drasticamente, adicionando algumas partes por milhão (ppm) de certos aditivos poliméricos de alto peso molecular. Esse fenômeno conhecido como redução de arrasto, reportado pela primeira vez por Toms (1948), tem atraído tanto os interesses acadêmicos como os interesses industriais, devido à importância e aplicabilidade no transporte de líquidos em tubulações. Entretanto, o transporte hidráulico de sólidos em tubos se apresenta como possível uso industrial do efeito de redução de arrasto. Desta forma, esta pesquisa tem por interesse investigar o comportamento dos polímeros redutores de arrasto no escoamento de águas com diferentes concentrações de particulados, através de uma sequência de testes conduzidos numa bancada experimental composta de um sistema de tubulações em série. No presente trabalho serão utilizadas águas obtidas diretamente de mananciais e carregadas de sedimentos com três diferentes concentração de sólidos. Nos experimentos, usando Óxido de Polietileno (PEO), Goma Xantana (XG) e Pó de quiabo (composto por fibras e polímeros naturais do quiabo) em concentrações de 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm é possível avaliar quais polímeros são mais eficientes em cada condição ao longo do tempo de experimento e a influência dos sólidos em suspensão na redução de arrasto induzida pelos polímeros. Os resultados evidenciam que, para as concentrações de sólidos utilizadas na pesquisa, não há alteração significativa no comportamento do PEO e XG, mostrando que podem ser diluídos nestes solventes sem perda significativa da eficiência dos redutores de arrasto. Porém, para o pó de quiabo, para determinadas concentrações do polímero e de sólidos no solvente, ocorre variações na eficiência do agente redutor de arrasto quando comparada a solução sem particulados.

Palavras-chave: Redução de arrasto. Sólidos em suspensão. Polímeros.

## ABSTRACT

It is known that in the non-particulate water the hydraulic drag can be reduced drastically, adding some parts per million (ppm) of certain high molecular weight polymeric additives. This phenomenon known as drag reduction, reported for the first time by Toms (1948), has attracted both the academic interests and the industrial interests, due to the importance and applicability in the transport of liquids in pipes. However, the hydraulic transport of solids in tubes is presented as possible industrial use of the drag reduction effect. In this way, this research is interested in investigating the behavior of the drag reducing polymers in the flow of water with different concentrations of particulates, through a sequence of tests conducted on an experimental bench composed of a system of pipes in series. In this work, water obtained directly from springs and laden with sediments with three different concentrations of solids will be used. In experiments, using polyethylene oxide (PEO), xanthan gum (XG) and okra powder (composed of natural fibers and polymers of okra) at concentrations of 50 ppm, 100 ppm and 200 ppm it is possible to assess which polymers are most efficient in each condition along the experiment time and the influence of suspended solids on polymer-induced drag reduction. The results show that, for the concentrations of solids used in the research, there is no significant change in the behavior of PEO and XG, showing that they can be diluted in these solvents without significant loss of the efficiency of the drag reducer. However, for okra powder, for certain concentrations of the polymer and solids in the solvent, variations in the efficiency of the drag reducer agent occur when compared to the non-particulate solution.

Keywords: Drag reduction. Suspended solids. Polymers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Teste experimental realizado pelos bombeiros de Nova Iorque .....	17
Figura 2 - Trajetória da redução por adição de polímeros.....	20
Figura 3 - Desenho da bancada experimental. (A) esquemático. (B) tridimensional.	30
Figura 4 - Reômetro Anton Paar Physica MCR 501 .....	31
Figura 5 - Teste de validação da bancada experimental .....	37
Figura 6 – Viscosidade das soluções com PEO .....	38
Figura 7 – Viscosidade das soluções com Goma Xantana .....	38
Figura 8 – Viscosidade das soluções com pó de quiabo.....	39
Figura 9 - Efeito da concentração de PEO na água de torneira (sem sólidos).....	43
Figura 10 - Efeito da concentração de XG na água de torneira (sem sólidos) .....	45
Figura 11 - Efeito da concentração de pó de quiabo na água de torneira (sem sólidos) .....	46
Figura 12 – Efeito da concentração de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm) .....	48
Figura 13 – Efeito da concentração de PEO em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm) .....	49
Figura 14 – Efeito da concentração de XG em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm).....	49
Figura 15 – Efeito da concentração de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm).....	50

Figura 16 – Efeito da concentração de PEO em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm).....	52
Figura 17 – Efeito da concentração de XG em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm).....	52
Figura 18 - Redução de arrasto em solução de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm). ....	53
Figura 19 - Redução de arrasto em solução de PEO em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm).....	54
Figura 20 - Redução de arrasto em solução de XG em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm).....	55
Figura 21 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 50 ppm de pó de quiabo .....	56
Figura 22 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de pó de quiabo .....	57
Figura 23 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de pó de quiabo .....	58
Figura 24 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 50 ppm de PEO.....	59
Figura 25 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de PEO.....	60
Figura 26 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de PEO.....	61
Figura 27 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 50 ppm de XG .....	62
Figura 28 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de XG .....	62
Figura 29 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de XG .....	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

ppm	partes por milhão
PAM	Poliacrilamida
PEO	Óxido de Polietileno
XG	Goma Xantana
MDR	máxima redução de arrasto
DRA	agente redutor de arrasto
$c$	concentração polimérica (ppm)
$DR$	coeficiente de redução de arrasto – $DR = 1 - f/f_0$
$\%DR$	coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
$\%DR_{máx}$	valor máximo do coeficiente de redução de arrasto (%)
$\%DR_{assint}$	valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto (%)
$D$	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
$l$	comprimento da seção de teste (m)
$\bar{u}$	velocidade média do escoamento (m/s)

$t^*$	tempo adimensional ou número de passes
$\overline{M}_v$	massa molecular média (g/mol)
$ST$	Sólidos totais (sólidos suspensos + sólidos dissolvidos)
$Q$	vazão do escoamento ( $m^3/h$ )
$Re$	número de Reynolds – $Re = \rho \bar{u} d / \eta$
$\eta$	viscosidade dinâmica da solução (Pa.s)
$\rho$	massa específica ( $kg/m^3$ )

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de sólidos das águas de estudo.....	34
Tabela 2 - Concentração de sólidos após diluição do polímero .....	36

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VI</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	16
1.2 ESTADO DA ARTE .....	18
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	28
<b>2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL</b> .....	<b>29</b>
2.1 EQUIPAMENTOS.....	29
<b>2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1.2 Reômetro</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1.3 Balanças</b> .....	<b>32</b>
2.2 CAPTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA COM SÓLIDOS EM SUSPENSÃO .....	32
2.3 PREPARO E TEMPO DE DILUIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	33
2.4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....	35
<b>2.4.1 Validação da bancada experimental</b> .....	<b>35</b>
<b>2.4.2 Testes com as soluções poliméricas</b> .....	<b>37</b>
<b>2.4.3 Análise de Incertezas</b> .....	<b>40</b>
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>42</b>

3.1	EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO E TIPOS DE POLÍMEROS NA REDUÇÃO DE ARRASTO .....	42
3.1.1	<b>Água de torneira (sem particulados)</b> .....	42
3.1.2	<b>Água com partículas sólidas em suspensão</b> .....	47
3.2	EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NA REDUÇÃO DE ARRASTO .....	55
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

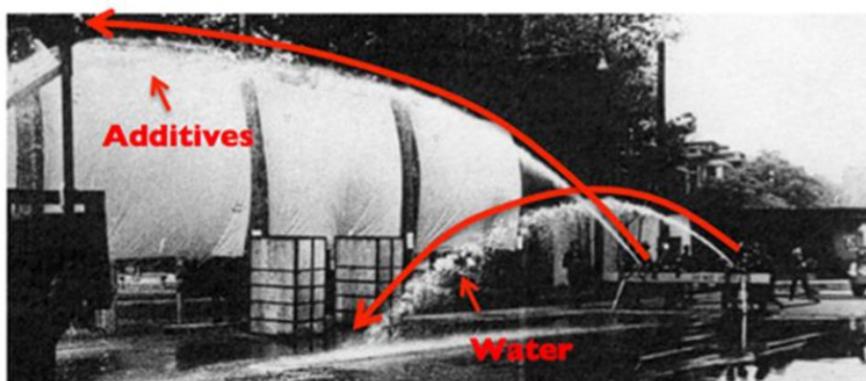
O transporte de líquidos através de tubulações, na maioria dos casos, continua sendo um dos setores que mais consomem energia devido ao regime turbulento em que são transportados. As estruturas turbulentas formadas dentro das tubulações durante o transporte dissipam o poder de bombeamento e aumentam a força de arrasto. Como resultado, a perda de energia reduz a capacidade de fluxo do fluido ao longo da tubulação. Assim, para aumentar a capacidade de bombeamento e reduzir a perda de energia, pode ser adicionada uma pequena concentração de um agente redutor de arrasto (DRA). Este fenômeno é conhecido como redução de arrasto.

Redução de arrasto é um fenômeno que foi observado inicialmente por Forrest e Grierson (1931) – primeiros a verificarem o fenômeno através do escoamento turbulento de água com fibra de celulose – porém, naquela época, o fenômeno não recebeu a devida importância. Toms (1948) e Mysels (1949) reportaram o mesmo fenômeno anos mais tarde que ficou conhecido como “*Toms effect*”. A partir de então, em termos de aplicação prática, essa técnica despertou interesse de diversos pesquisadores, bem como de processos industriais (escoamentos de líquidos) e diferentes áreas da engenharia em que se deseja solução parcial para perda de energia em escoamentos.

A primeira aplicação comercial de polímero agente redutor de arrasto, em alta escala, é o transporte de óleo bruto através de um sistema de dutos no Alasca, conhecido como “*Trans-Alasca Pipe Line*”, um sistema com tubulações de 48 polegadas de diâmetros, extensão de aproximadamente 1300 km e com 12 estações de bombeamento. De acordo com Burger e Chorn (1980), o resultado foi um sucesso - apenas algumas partes por milhão de DRA (poliolefinas - um hidrocarboneto longo e solúvel em óleo) foram injetadas na tubulação com objetivo de aumentar a vazão, obtendo-se um ganho na produção de aproximadamente 30%, mantendo-se o diferencial de pressão constante.

As aplicações não se limitam ao setor petrolífero. A redução de arrasto através de aditivos é também empregada com sucesso em diversas áreas e processos industriais. Fabula (1971) e Figueiredo e Sabadini (2003) investigaram a utilização de soluções poliméricas em sistemas de combate a incêndio, em que o principal objetivo era utilizar a menor quantidade de energia para bombear a água e aumentar o alcance dos jatos, proporcionando maior segurança aos combatentes. A Figura 1 ilustra a diferença de alcance para solução com e sem aditivo.

Figura 1 - Teste experimental realizado pelos bombeiros de Nova Iorque



Fonte: Bailey e Koleske (1976).

Diversos outros exemplos de aplicação podem ser descritos, citemos Singh e outros (1985), indicam a utilização em hidrelétricas e em sistemas de irrigação para aumentar a vazão de água ou economizar energia de bombeamento no processo. Larson (2003) que constatou um aumento na velocidade de embarcações utilizando aditivos no casco de navios, cujo objetivo era diminuir o atrito entre o casco e a água. Também, pesquisas realizadas na área da medicina, que apresentam importantes resultados, como a supressão de aterosclerose (MOSTARDI et al., 1978; UNTHANK et al., 1992; CHEN et al., 2011), e na prevenção da letalidade do choque hemorrágico (KAMENEVA et al., 2004).

Pesquisadores em muitos países têm procurado aplicações industriais economicamente atraentes para aditivos redutores de arrasto. Neste contexto, segundo Sellin (1989), um dos aspectos da redução de arrasto de particular interesse é comportamento de sólidos em suspensão. De acordo o pesquisador, a presença de sólidos em suspensão em altas concentrações, em aplicações de hidrotransporte, exige cuidados especiais, pois os polímeros podem ser fortemente adsorventes ou

flocularem, dependendo da relação iônica entre o polímero e os sólidos em suspensão, podendo comprometer a eficiência da solução polimérica.

Estudos realizados por autores como Povkh e Stupin (1972), Fujimoto e Tagori (1974), citados por Sellin (1989, p. 386), Golda (1986), Kolář e outros (1988), Abdulbari e Yunus (2009), deram grande contribuição para a compreensão do fenômeno de redução de arrasto com sólidos em suspensão, utilizando como particulados carvão, argila, cinzas, areia, minério de ferro, entre outros. Na maioria dos casos, o incremento da concentração de sólidos tornou menos evidente o fenômeno de redução de arrasto.

Contudo, muitas das aplicações da redução de arrasto exigem estudos específicos sobre os efeitos da concentração de sólidos presentes em águas de mananciais (oriunda de rios, lagos, córregos, represas), por exemplo, em transporte hidráulico nos sistemas de tratamento de água e esgoto, de irrigação e transporte de águas pluviais em geral. Apesar do potencial de utilização, a avaliação de tais efeitos ainda carece de um maior detalhamento nas investigações, no que se refere, principalmente, ao comportamento em relação aos agentes poliméricos redutores de arrasto.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo contribuir para um melhor entendimento do efeito de suspensões sólidas na eficiência da redução de arrasto, através de um método experimental, avaliando o efeito da concentração de sólidos presentes em águas de mananciais, em relação a eficiência dos polímeros rígidos (pó de quiabo e goma xantana) e flexível (óxido de polietileno).

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Como mencionado anteriormente, os primeiros a observarem o fenômeno de redução de arrasto foram Forrest e Grierson (1931), que aplicaram fibra de polpa de madeira em água, observando que essa mistura diminuía a energia necessária para manter o fluxo do escoamento.

Já no final da década de 1940, Toms (1948) observou que usando soluções poliméricas em baixa concentração e alto peso molecular (polimetilmetacrilato em monoclorobenzeno), alcançava-se uma significativa redução do fator de atrito em escoamentos com alto número de Reynolds. Obteve-se um aumento da vazão,

mantendo um mesmo diferencial de pressão, e uma diminuição da queda de pressão para soluções com aditivos para uma mesma vazão, quando comparado ao solvente puro. Devido à relevância dos resultados obtidos por Toms, e por ter sido o primeiro a reportar em congresso o fenômeno, o mesmo passou a ser conhecido como “*Toms effect*”.

Levando em consideração escoamentos em tubos, Savins (1964) introduz o termo “redução de arrasto” e o relaciona aos gradientes de pressão da solução e do solvente, medidos à mesma vazão e na mesma tubulação. Porém, Lumley (1969) considera a análise da redução de arrasto em função do fator de atrito da solução ( $f$ ) e do solvente ( $f_0$ ), em que se observa a redução de arrasto quando o fator de atrito obtido pela solução polimérica é inferior ao fator de atrito do solvente puro, com mesmo número de Reynolds. Essa definição é a mais utilizada e é definida pela Equação 1, em termos percentuais.

$$\%DR = \left(1 - \frac{f}{f_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

Contudo, os mecanismos acerca do fenômeno de redução de arrasto ainda não são completamente compreendidos e dividem opiniões dos pesquisadores. As teorias que abordam a análise do fenômeno podem ser divididas em duas classes que estão baseadas nos efeitos do estiramento do polímero, uma proposta por Lumley (1973), que é baseada em efeitos viscosos, e outra que é baseada em efeitos elásticos, proposta por Tabor e De Gennes (1986).

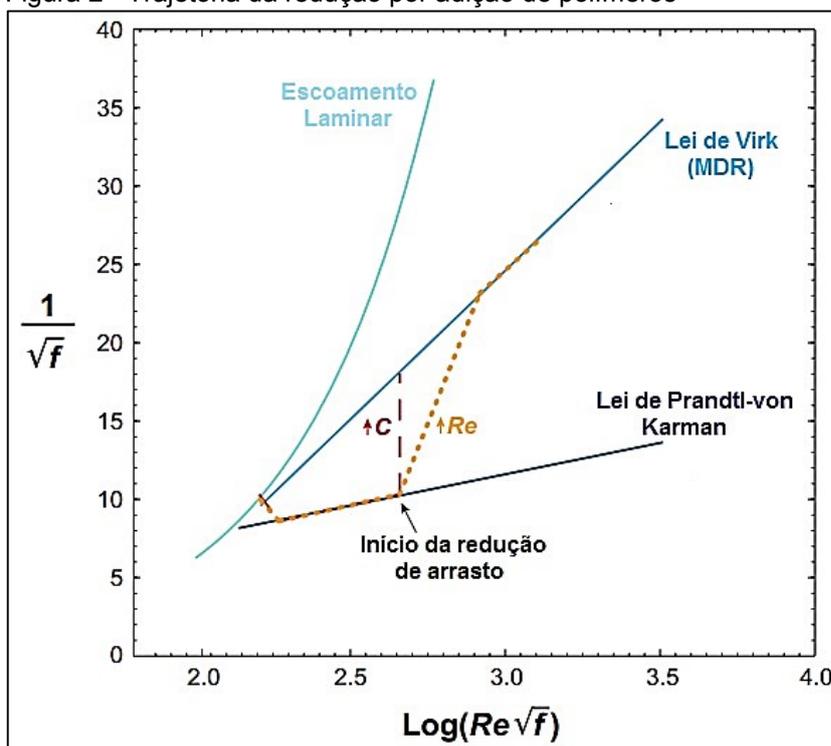
Dubief e outros (2004), utilizando simulação numérica, apresentam uma proposta interessante para descrever a interação entre as moléculas de polímeros flexíveis e o escoamento turbulento, analisando o escoamento de um fluido viscoelástico do tipo FENE-P (“*Finitely Extensible Nonlinear Elastic - Peterlin*”) em um canal. No caso, as macromoléculas trabalham de forma cíclica e organizada, armazenando energia dos menores vórtices localizados próximos às paredes quando são esticadas e cedendo energia na direção do escoamento quando voltam a se encolher.

Pereira e outros (2017), complementam os trabalhos de Dubief e outros (2004), utilizando simulação numérica direta para simular três casos viscoelásticos e analisar

o mecanismo de redução de arrasto no regime transiente em determinado número de Reynolds, demonstrando que o escoamento cisalhante principal, o estiramento do polímero e as estruturas turbulentas presentes no escoamento têm papel muito importante na redução de arrasto.

Um aspecto importante diz respeito a máxima redução de arrasto (MDR - Maximum Drag Reduction), retratada por Virk, Mickley e Smith (1967), em estudos experimentais com diferentes soluções poliméricas em escoamentos em dutos. Também conhecido como Lei de Virk ou assíntota de Virk, o limite de máxima redução de arrasto é o valor máximo do %DR que pode ser atingido. Os autores observaram que mantendo fixo o número de Reynolds ( $Re$ ) o incremento da concentração do polímero eleva os níveis de redução de arrasto até um valor máximo possível, MDR, em que não mais se observa o aumento na redução de arrasto. A partir de então, a solução é considerada saturada, ou seja, um incremento a mais de polímero ao solvente não mais tem influência no fator de atrito (linha tracejada vermelha). Similarmente, se a concentração for mantida fixa e o número de Reynolds do escoamento for incrementado gradativamente, os valores de redução de arrasto também atingem seu valor máximo (linha pontilhada laranja). A Figura 2 ilustra tais comportamentos.

Figura 2 - Trajetória da redução por adição de polímeros



Fonte: White e Mungal (2008).

Segundo White e Mungal (2008), a máxima redução de arrasto tem dividido a interpretação dos pesquisadores das teorias viscosa e elástica. Virk (1975) e Sreenivasan e White (2000), baseados na teórica viscosa, defendem que a MDR ocorre quando o efeito do polímero é sentido em todas as escalas do escoamento, fazendo com que a subcamada de transição se estenda por toda camada limite. Já Warholic, Massah e Hanratty (1999), Ptasinski e outros (2001) e Min e outros (2004), cuja interpretação está associada a teoria elástica, sugerem que a MDR ocorre quando os tensores de Reynolds são fortemente diminuídos e os mecanismos que sustentam a turbulência são especialmente conduzidos pelas flutuações das tensões dos polímeros.

Outro assunto que divide a opinião de vários pesquisadores em relação às teorias viscosas e elásticas é o início da redução de arrasto, o qual acontece somente em certos níveis de turbulência, conforme apresentado também na Figura 2. Para os defensores da teoria viscosa, o início da redução de arrasto acontece quando os vórtices da subcamada de transição se tornam capazes de esticar as moléculas, causando o aumento da viscosidade extensional e conseqüentemente a supressão das flutuações turbulentas, aumentando a espessura da subcamada de transição em direção ao centro do tubo e reduzindo a perda de energia do escoamento (LUMLEY, 1969; L'VOV et al., 2004). Já em relação a teoria elástica, defendida por Tabor e De Gennes (1986) e Joseph (1990), o início da redução de arrasto é verificado quando a energia armazenada pelas moléculas parcialmente esticadas é equiparável à energia cinética turbulenta de algumas escalas na região da subcamada de transição, interrompendo prematuramente a cascata de Kolmogorov e impedindo que os vórtices maiores se dividam em vórtices menores, os quais são responsáveis pela dissipação de energia do escoamento nas menores escalas de turbulência.

Outro aspecto muito importante e que caracteriza um dos principais problemas dos polímeros como agentes redutores de arrasto é o fenômeno da degradação polimérica. Em relação aos agentes causantes, pode ser: biológica, química ou mecânica. As degradações biológicas são causadas por microrganismos como bactérias e fungos. Já a química pode ocorrer devido à presença de ácidos, metais, oxigênio e em altas taxas de salinidade no solvente. Finalmente a degradação mecânica está relacionada às tensões cisalhantes do escoamento turbulento. Segundo White e Mungal (2008), devido às tensões do escoamento, esse fenômeno

corresponde ao rompimento e, por consequência, divisão das macromoléculas em moléculas menores, causando considerável perda de eficiência do aditivo.

Quanto às cisões da macromoléculas, Merrill e Horn (1984), utilizando técnicas de cromatografia de permeação em gel, verificaram que elas ocorrem próximo ao seu ponto médio. Sugerem, ainda, que a degradação ocorre quando as cadeias encontram-se esticadas e alinhadas com o escoamento. Resultados experimentais mostram que, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, após um longo período de tempo, a massa molecular média diminui e a redução de arrasto tende a um regime permanente, a partir do qual nenhuma degradação adicional é observada (CHOI et al., 2000; NAKKEN; TANDE; ELGSAETER, 2001; VANAPALLI; ISLAM; SOLOMON, 2005; PEREIRA; SOARES, 2012).

Paterson e Abernathy (1970), através da análise sobre o comportamento da degradação em soluções de Óxido de Polietileno, polímero flexível, em escoamento turbulento em dutos, verificaram que a degradação das moléculas é mais intensa para números de Reynolds mais acentuados e que a resistência da solução cresce com o aumento da massa molecular ou concentração, resultados confirmados por Moussa e Tiu (1994), Pereira e Soares (2012) e Soares e outros (2015).

Kenis (1971), Bewersdorff e Singh (1988), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares e outros (2015), utilizando Goma Xantana e Goma Guar, revelam a capacidade de polímeros rígidos em reduzir arrasto em escoamentos turbulentos e constatam que o acréscimo da concentração e massa molecular provoca o aumento da redução de arrasto, assim como ocorre para os polímeros flexíveis. Porém, 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.

Segundo Andrade, Pereira e Soares (2016) e Soares e outros (2015), a perda de eficiência observada nos polímeros rígidos se deve à desagregação das moléculas e não à quebra das cadeias, como observado nos polímeros flexíveis. Neste caso, acredita-se que a solução polimérica formada por polímeros rígidos, como a Goma Xantana, forma agregados de moléculas interconectadas por forças intermoleculares. Dessa forma, quando expostas ao escoamento turbulento, ocorre o rompimento

dessas ligações causando a desagregação das moléculas e, conseqüentemente, diminuindo o comprimento médio das mesmas, de modo a causar perda na eficiência no %DR. Essa teoria também foi utilizada por Coelho e outros (2016) em seus estudos de redução de arrasto com mucilagem<sup>1</sup> e fibra de quiabo.

Virk, Sherman e Wagger (1997), em relação aos materiais rígidos e flexíveis, propõem dois mecanismos de redução de arrasto, Tipo A e Tipo B. Associado aos polímeros flexíveis, o mecanismo Tipo A propõe que uma vez que os polímeros se encontram inicialmente encolhidos em repouso, é necessário um nível de turbulência capaz de esticar as moléculas, de modo a iniciar a redução de arrasto. Já o mecanismo Tipo B, característico de materiais rígidos, cujas estruturas já se encontram alongadas e em repouso, a redução de arrasto ocorre após a mudança entre os regimes laminar e turbulento, uma vez que não apresentam variação em sua estrutura molecular quando submetido a turbulência do escoamento. Gasljevic, Aguilar e Matthys (2001), analisando os mecanismos de redução de arrasto propostos acima, verificaram que os materiais do Tipo A passam a apresentar um comportamento do Tipo B a partir do momento que suas macromoléculas estiverem totalmente estiradas e antes que a degradação se torne significativa.

É importante, também, destacar as principais características dos polímeros que são utilizados neste trabalho: Óxido de Polietileno (PEO), Goma Xantana (XG) e pó de quiabo. O Óxido de Polietileno é um polímero sintético, obtido da polimerização do óxido de etileno (éter cíclico, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O), de cadeia linear e flexível, solúvel em água, e amplamente empregado em estudos de redução de arrasto devido aos altos níveis de redução de arrasto alcançados, como destacam Virk e outros (1967), Paterson e Abernathy (1970), Kalashnikov (1998), Choi e outros (2000), Bizotto e Sabadini (2008) e Pereira e Soares (2012).

A Goma Xantana é um polissacarídeo de alta massa molecular originado de fermentações por bactérias do tipo "*Xanthomonas campestris*". Constituído por uma cadeia linear principal de glucose com uma cadeia lateral de trissacarídeos, que lhe

---

<sup>1</sup> Substância viscosa produzida por quase todas as plantas e alguns microrganismos (ABDULBARI; SHABIRIN; ABDURRAHMAN, 2014).

confere rigidez e considerável estabilidade mecânica, similar a celulose, ela é considerada um biopolímero de cadeia rígida (que não degrada mecanicamente). Como o PEO, a XG é solúvel em água e, provavelmente, é o agente redutor de arrasto natural mais utilizado (MORRIS, 1977; MULLER et al., 1986; BEWERSDORFF; SINGH, 1988; SOHN et al., 2001; WYATT; GUNTHER; LIBERATORE, 2011; SOARES et al., 2015; SANDOVAL; SOARES, 2016; ANDRADE; PEREIRA; SOARES, 2016).

Já a mucilagem extraída do quiabo como agente redutor de arrasto é relativamente recente e não possui muitos estudos disponíveis na literatura. Os principais a respeito desse agente redutor de arrasto foram realizados por Abdulbari e outros (2010, 2011, 2012, 2014) e, mais recentemente, Coelho e outros (2016), que utilizaram uma mistura de fibra e mucilagem de quiabo como DRA natural. Abdulbari, Ahmad e Yunus (2010) avaliaram como a variação do diâmetro da tubulação, concentração de polímero e número de Reynolds influenciam na redução de arrasto. Posteriormente, os autores Abdulbari, Kamarulizam e Man (2011) apontaram o baixo custo do quiabo como uma vantagem de seu uso como DRA. Abdulbari, Kamarulizam e Nour (2012) também avaliaram o uso da mucilagem de quiabo como DRA, só que desta vez utilizando dois diferentes fluidos como solvente, água e hidrocarboneto líquido.

A maior parte dos estudos envolvendo o fenômeno de redução de arrasto são feitos a partir de polímeros sintéticos, que embora apresentem vantagens em termos de eficiência, têm baixa resistência às tensões cisalhantes durante o escoamento turbulento, além de serem tóxicos e com alto valor comercial em comparação aos polímeros naturais.

Singh, Jaafar e Yusup (2014), por exemplo, ressaltaram o potencial de biopolímeros encontrados na natureza como agentes redutores de arrasto, pois eles não prejudicam o meio ambiente com a contaminação do solo e apresentam uma vantagem em relação aos flexíveis, que é sua alta resistência a degradação mecânica. Entretanto, por serem naturais possuem uma desvantagem que é a degradação biológica.

Outro fator importante, que é de interesse para este trabalho, é o efeito do solvente na redução de arrasto. Hershey e Zakin (1967) verificaram que poliisobutileno apresenta maior capacidade de reduzir o fator de atrito em uma solução de

ciclohexano do que em benzeno. Para os autores, as macromoléculas se expandem mais livremente em bons solventes, e ficam retraídas em maus solventes. Através de experimentos, Zakin e Hunston (1978) observaram que a qualidade do solvente é muito importante no processo de degradação mecânica e apontam que o início da redução de arrasto ocorre em menores números de Reynolds quando o polímero está dissolvido em um bom solvente e que para condições em que ocorra degradação em ambos os solventes, ela ocorre mais rapidamente no solvente ruim.

Através de estudos com poliacrilamida em solução salina, Virk (1975), Virk e Wagger (1989) e Rochefort Middleman (1989) constataram que a redução de arrasto é mais evidente em meio aquoso com menor concentração salina do que em uma solução com maior concentração de sal. Observaram ainda, que a conformação molecular pode ser modificada, alterando a concentração salina da solução. Elbing e outros (2009) e Kamel e outros (2009), por meio de análise experimental de escoamento em dutos, verificaram o efeito na redução de arrasto e da degradação polimérica utilizando água do mar. Segundo os autores, há um atraso no início da redução de arrasto e queda da máxima redução de arrasto para a água do mar, em comparação com a água pura (sem sal). Elbing e outros (2009) não observaram grande influência da salinidade na degradação do polímero. Recentemente, Andrade, Pereira e Soares (2016) em experimentos em reômetro com geometria rotativa de dupla folga observaram que, para as soluções de PEO e XG, o aumento da concentração de sal provoca aumento do arrasto, ou seja, o %DR é reduzido pela presença de salinidade. No caso da PAM, não notaram nenhuma alteração no %DR mostrando que a salinidade parece não afetar a conformação deste polímero.

Ainda em relação ao efeito do solvente na redução de arrasto, o transporte hidráulico de sólidos em tubos se apresenta como possível uso industrial do efeito de redução de arrasto. De acordo com Booth (1970) muitas experiências foram realizadas a fim de determinar as condições ideais para o transporte de carvão. Em maior concentração e granulometria de sólidos, estas misturas se tornam fortemente não-newtonianas e os aditivos poliméricos nestas condições têm um efeito mais complexo e os mecanismos de turbulência normais não podem ser assumidos e uma redução no fator de atrito causada por aditivos poliméricos pode ser o resultado de algum efeito bastante diferente.

Golda (1986) e Kim e outros (1991) avaliaram o efeito da redução de arrasto produzida por aditivos poliméricos no transporte hidráulico de carvão, sendo que a redução de arrasto nas misturas de água-carvão, contendo polímero, foi menor do que nas soluções de polímero puras (não contendo partículas sólidas), ou seja, um aumento da concentração de sólidos reduz o efeito de redução de arrasto produzido pela injeção do polímero. Golda (1986) relata que, para o caso de aditivos poliméricos flocculantes, acredita-se que os mesmos sejam adsorvidos na superfície de sólidos e que esta adsorção leva a uma diminuição da concentração efetiva de polímero no tubo e uma diminuição na redução do arrasto.

Utilizando como fase sólida areia, cinzas, argila e carvão realizou-se estudo acerca do efeito do aditivo de poliacrilamida na redução de arrasto hidráulico em escoamentos com partículas sólidas suspensas (POVKH; STUPIN, 1972). De acordo com os pesquisadores, a adição de um componente sólido, como areia e cinzas, a uma solução aquosa de poliacrilamida, suprime a redução de arrasto, de modo que, à medida que mais componente sólido é adicionado menos evidente é a redução de arrasto. Já em relação a argila e carvão, para as concentrações utilizadas, nenhuma redução de arrasto foi observada. Segundo os autores, à medida que a poliacrilamida é adicionada às referidas suspensões aquosas, formam-se estruturas floculares que precipitam a partir da solução e o efeito de amortecimento no arrasto hidráulico é perdido.

Já para o escoamento em tubo carregado de areia de quartzo (20% em volume), Poreh e outros (1970), citados por Sellin (1989, p. 382), realizaram testes com o uso de um biopolímero, goma guar, e uma mistura de dois sabões complexos. A energia necessária para bombear a lama com a adição de sabão foi igual a 30% daquela necessária em água pura. Entretanto, o polímero não mostrou-se tão eficaz na economia de energia para bombeamento da solução carregada de sólidos. Todavia, testes realizados em um encanamento com areia, dragado na Holanda, Interthal e outros (1983), citados por Sellin (1989, p. 383-384), com o uso de polímero, baseado em poliacrilamida, observou-se uma redução de arrasto máxima de até 45 %.

Abdulbari e Yunus (2009) avaliaram o efeito da redução de arrasto usando Sulfato de Éter Laurílico de Ácido Laurílico (SLES), surfactante aniônico, no transporte de sólidos em suspensão (areia e alumina) misturados à querosene. Ao considerar a aplicação

de aditivos de redução de arrasto para sistemas de hidrotransporte de sólidos, é importante investigar o comportamento reológico da solução tanto com e sem aditivo adicionado. Segundo os autores, as partículas sólidas de alumina e areia se comportam como bons agentes redutores de arrasto e a interação entre a solução suspensa e os aditivos foi bem sucedida na melhoria do escoamento e na eficiência de redução de arrasto com adição dos particulados.

Resultados de experimentos realizados em uma instalação de tubulação de laboratório examinaram o efeito de redução de arrasto com adição de separan AP-30, uma poliacrilamida aniônica, a suspensões de minério de ferro. Quatro concentrações de minério foram testadas, e verificou-se que valores de até 50% foram alcançados, mas que a redução de arrasto diminuiu quando o carregamento de sólidos é aumentado (FUJIMOTO; TAGORI, 1974, apud SELLIN, 1989, p. 386). Os autores ainda observaram que os valores do número de Reynolds em que ocorre o aparecimento da redução do arrasto aumentam com a concentração de minério de ferro, similar ao efeito observado em muitas investigações em que são utilizados tubos de diâmetro crescente. Com a crescente concentração de particulados, é possível que haja modificação na turbulência no tubo, necessitando de um fluxo maior de energia propício a redução de arrasto polimérico.

As cinzas geradas pelas centrais de queima de carvão é um problema crescente, devido à necessidade de eliminação desses resíduos sólidos. A necessidade de bombeamento dos rejeitos para as fontes de captação, envolve aumento de capital e custos operacionais para as tubulações e bombas necessárias. Dessa forma, um programa de experiências de redução de arrasto foi iniciado na Checoslováquia em 1976, com o objetivo de investigar a viabilidade de redução de arrasto com as cinzas à base de água, além da degradação do polímero nas tubulações de hidrotransporte de cinzas.

Kato (1972), citado por Sellin (1989, p. 389), já havia injetado polímero em suspensões de cinzas com conteúdo de sólidos na faixa de 10 - 25%, em volume, e obteve redução de arrasto de até 50%, que foi bastante inferior ao obtido em água no mesmo tubo de PVC de 13 mm. Posteriormente, Kolář e outros (1988) realizaram testes em uma tubulação 18 km de comprimento, 600 mm de diâmetro na estação de energia térmica de Tusimice, na Checoslováquia. Esta tubulação carregava uma lama de cinzas e

escória misturados para a lagoa de eliminação final, em que o polímero Separan AP-302 foi injetado com o intuito de aumentar a taxa de transporte de sólidos para  $2 \text{ Mm}^3$  por ano. Testes de laboratório realizados em pequenas tubulações com os mesmos materiais mostraram um alto nível de redução de arrasto e nenhum efeito de sedimentação adversa devido à interação entre o polímero e os sólidos.

Apesar dos relevantes avanços em relação ao transporte de soluto, muitos pontos ainda carecem de investigação, por exemplo, em relação ao estudo o efeito da concentração de sólidos presentes em água de mananciais em relação a redução de arrasto induzida por polímeros, que é a proposta do problema abordado nesta dissertação.

### 1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho estuda experimentalmente o fenômeno de redução de arrasto, por adição de polímeros rígidos e flexível, em escoamentos turbulentos de água com sólidos em suspensão. Os polímeros redutores de arrasto estudados são Goma xantana, pó de quiabo e Óxido de polietileno em três diferentes concentrações: 50, 100 e 200 ppm. Para isso, utiliza-se uma bancada experimental constituída de tubulações estreitas retas por onde é conduzida a solução de teste. São utilizados como solventes, além da água de torneira (sem particulados), águas com três diferentes concentrações de sólidos, de modo a avaliar a eficiência do polímero em cada solvente e a influência dos sólidos na redução de arrasto induzida pelos polímeros.

## 2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Nesta seção, são descritos os principais equipamentos utilizados bem como a metodologia adotada para realização dos experimentos.

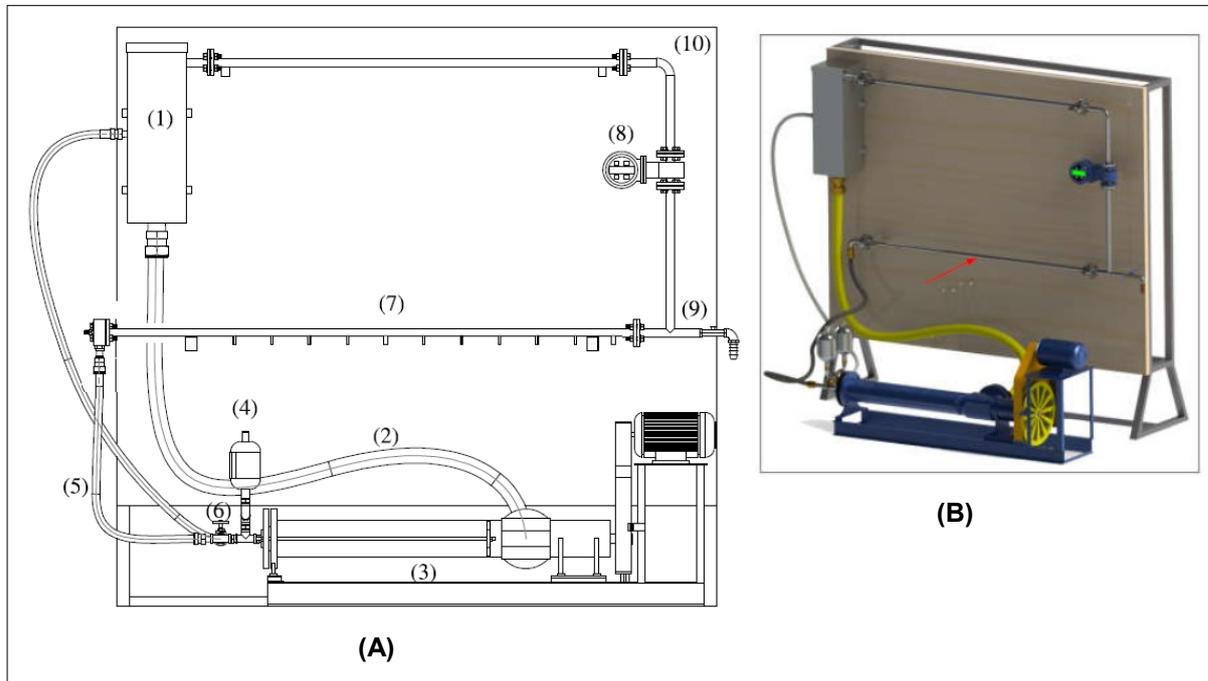
### 2.1 EQUIPAMENTOS

#### 2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto

A utilização de geometria rotativa para estudo de redução de arrasto tem apresentado resultados satisfatórios e é um método bastante utilizado, conforme reportado por Choi e John (1996), Sohn e outros (2001) e Andrade, Pereira e Soares (2014). Porém, a utilização de geometrias rotativas gera um escoamento com características distintas das normalmente encontradas na prática. Assim, com objetivo de atingir regimes turbulentos condizentes aos apresentados em aplicações práticas, diversos pesquisadores, como Virk (1975), Bewersdorff e Singh (1988) e Elbing e outros (2009) têm direcionado seus estudos de redução de arrasto para escoamento turbulento em dutos, mesmo que esse método apresente elevado custo, grande aparato experimental, maior volume de solução de testes e demanda de tempo experimental.

Neste trabalho utilizou-se uma bancada experimental que é composta por tubulações retas de seção circular por onde escoava a solução, Figura 3. Uma grande vantagem desta montagem em relação à utilizada por Coelho e outros (2016), Sandoval e Soares (2016), Barbosa (2017) é a quantidade de amostra necessária para execução dos testes. Além das tubulações e da bomba, a bancada possui elementos fundamentais para a realização dos testes de redução de arrasto, que são: um reservatório para armazenamento do fluido, um medidor de vazão eletromagnético, dois medidores de pressão estática e um inversor de frequência para acionar a bomba de deslocamento positivo. A bancada utilizada nesta pesquisa foi projetada por Loureiro e outros (2011) e também foi utilizada por Costalonga (2017).

Figura 3 - Desenho da bancada experimental. (A) esquemático. (B) tridimensional



Fonte: Costalonga (2017).

Nota: Figura A adaptada pelo autor.

Visando um melhor entendimento sobre o funcionamento da bancada, discorreremos que a solução de teste é armazenada em um reservatório (1) que contém quatro termopares que monitoram a temperatura do fluido por meio de um fluido secundário, proveniente de um banho termostático Laula Proline RP1845 que flui por uma serpentina de cobre localizada no interior do reservatório. Depois, a solução escoar através de um mangote hidráulico (2) até a bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal Weatherford, modelo WHT40 F (3). A partir de então, um inversor de frequência CFW-08-RS-485 é utilizado para acionar e controlar a rotação da bomba. Na sequência, o fluido é encaminhado a seção de teste (7) por meio de uma mangueira de 1" (5), onde as pressões estáticas são medidas por dois transdutores de pressão estática Warme com 0,1% de incerteza do fundo de escala. O trecho da seção principal de teste (onde estão instalados os transdutores de pressão) é composto de um tubo brunido de aço inoxidável 3/8" e 1,5 m de comprimento, o que diminui significativamente a rugosidade nesse trecho de tubulação, pois a mesma fica coberta pela subcamada laminar e o escoamento pode ser considerado como em um tubo liso e não influencia no fator de atrito. Dois transdutores de pressão encontram-se localizados a partir do ponto onde o escoamento turbulento é completamente

desenvolvido, são instalados em pequenos orifícios de 2 mm de diâmetro de modo a não interferem na medição de pressão e estão distantes 1 m entre si. Após a seção de teste, a solução é encaminhada para uma seção vertical onde é tomada a medida de vazão volumétrica, obtida por meio de um medidor de vazão (8) do tipo eletromagnético Rosemount série 8700 com precisão de 0,15% e, logo após, a solução retorna para reservatório de armazenamento. Todo o circuito é isolado termicamente com espuma elastomérica. O experimento é controlado por meio de supervisorio desenvolvido pela plataforma LabView 2010 e a comunicação é feita por uma rede industrial.

### 2.1.2 Reômetro

A análise da viscosidade das soluções estudadas foi feita através de um reômetro comercial Anton Paar Physica MCR 501, Figura 4, utilizando uma geometria rotativa formado por dois cilindros concêntricos de dupla folga “Double Gap DG-42”, assistido por computador e equipado com um banho termostático capaz de oferecer um controle preciso de temperatura. Esse foi o mesmo equipamento utilizado por Silva (2017) e Costalonga (2017).

Figura 4 - Reômetro Anton Paar Physica MCR 501



Fonte: Silva (2017).

Esse reômetro necessita do suporte de um compressor isento de óleo para seu funcionamento, uma vez que utiliza ar comprimido para lubrificação. Equipamento similar foi utilizado nos trabalhos de Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014).

### **2.1.3 Balanças**

Para a preparação das amostras, os polímeros foram pesados utilizando uma balança analítica Mettler Toledo modelo XS204, com precisão de 0,0001g. Também foi usada uma balança eletrônica de precisão com capacidade de 10 kg, série AC modelo 10K classe II fabricada pela empresa MARTE, com precisão de 0,1g, utilizada para pesagem dos solventes.

## **2.2 CAPTAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA COM SÓLIDOS EM SUSPENSÃO**

As amostras de água com sólidos em suspensão utilizadas neste trabalho foram coletadas diretamente de represas utilizadas para bombeamento de água em sistema de irrigação na localidade de São Manoel, Zona Rural de Castelo/ES, em diferentes épocas do ano (períodos de estiagem e de chuva), com objetivo de se obter variação na concentração de sólidos presentes na água de estudo. A captação da água foi realizada pelo próprio sistema de bombeamento utilizado no processo de irrigação. As impurezas contidas na água podem ser de origem mineral, orgânica ou biológica e estão principalmente em duas formas: em suspensão ou dissolvidas.

Uma vez que a proposta do trabalho é investigar o efeito da concentração de sólidos na redução de arrasto induzida pelos polímeros, e por consequência, o efeito de polímeros redutores de arrasto no transporte hidráulico de sólidos, no Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) foram quantificados os materiais particulados pelo método a vácuo em aparelho Millipore, com membranas filtrantes com poros de 0,45  $\mu\text{m}$ . As amostras filtradas variaram de 50 mL, para grandes concentrações, até 100 mL para baixas concentrações, com pouco material em suspensão. Considera-se sólidos suspensos

os sólidos que ficam retidos na membrana de fibra de vidro após a filtração. Já os sólidos dissolvidos são os que passam na filtração. A Tabela 1 mostra os dados obtidos das três amostras de água carregadas de sedimentos utilizadas no presente estudo.

Tabela 1 – Concentração de sólidos das águas de estudo

<b>AMOSTRA I</b>
<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 100,5 ppm
<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 206 ppm
<b>SÓLIDOS TOTAIS (ST):</b> 306,5 ppm
<b>AMOSTRA II</b>
<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 224 ppm
<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 280 ppm
<b>SÓLIDOS TOTAIS (ST):</b> 504 ppm
<b>AMOSTRA III</b>
<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 502 ppm
<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 202 ppm
<b>SÓLIDOS TOTAIS (ST):</b> 704 ppm

## 2.3 PREPARO E TEMPO DE DILUIÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste trabalho três diferentes polímeros foram analisados: Óxido de Polietileno (PEO), Goma Xantana (XG) e Pó de Quiabo (contendo polímeros e fibras constituintes do quiabo - *Abelmoschus esculentus L. Moench*). O PEO e XG foram fornecidos pela Sigma- Aldrich, já o pó de quiabo é preparado segundo metodologia descrita por Coelho e outros (2016), sendo que os polímeros comerciais utilizados, Goma Xantana e Óxido de Polietileno, possuem massa molecular média de  $2 \times 10^6$  g/mol e  $5 \times 10^6$  g/mol, respectivamente.

O procedimento de preparação das amostras adotado visou evitar que a água carregada de sedimentos ficasse armazenada por muito tempo para total diluição do

polímero, de modo minimizar o efeito de decantação natural dos particulados presentes na água de estudo, o que poderia influenciar a investigação do efeito de polímeros redutores de arrasto no transporte da água com sólidos em suspensão. Assim, uma vez que foram utilizados nos experimentos 20 litros de solução de teste, o polímero foi diluído inicialmente em 4 litros de água deionizada, obtendo soluções estoques concentradas de 1000 ppm, 500 ppm e 250 ppm, de forma que fossem totalmente utilizadas para compor a solução final. Posteriormente, as soluções estoques foram diluídas em 16 litros de água carregada de sedimentos ou água de torneira (sem particulados) de modo a obter as concentrações de estudo desejadas: 200 ppm, 100 ppm e 50 ppm, respectivamente.

Para preparação das amostras de solução estoque, os polímeros (em pó) foram depositados diretamente sobre a água deionizada, a 25°C. Após a adição do polímero, os recipientes foram lacrados e a mistura foi realizada sem agitação de uma fonte externa, de modo a evitar qualquer degradação antes do início dos experimentos. Para as soluções de PEO, o tempo de diluição foi de 72 h, e para XG, o tempo de diluição foi de 48 h, semelhante ao procedimento utilizado por Soares e outros (2015) e Sandoval e Soares (2016). Já para o pó de quiabo, apesar de 1 hora se mostrar suficiente, para este trabalho foi utilizado o tempo de 2 horas para diluição das soluções de estudo, visando maior confiabilidade e seguindo o mesmo procedimento adotado por Coelho e outros (2016).

Um vez realizada a completa difusão natural dos aditivos, as soluções estoques de PEO e XG foram diluídas por mais 3 h nas águas com sólidos, para evitar decantação natural dos particulados presentes na água estudo. O mesmo procedimento foi utilizado para água de torneira (sem particulados), de modo a obter maior confiabilidade na comparação dos resultados da redução de arrasto em transporte de fluido com e sem sólidos. Em relação ao pó de quiabo, as soluções estoques, após liberação e diluição do polímero no solvente inicial, foram diluídas em água carregada de sedimentos ou água de torneira, misturando suavemente a solução por 10 minutos para ocorrer sua total homogeneização.

Desta forma, seguindo os métodos de preparação e diluição supracitados, as amostras de água com sólidos em suspensão utilizadas nos testes da bancada experimental obtiveram as características descritas na Tabela 2. Vale ressaltar, que

para avaliar influência dos sólidos na redução de arrasto polimérico, seção 3, são utilizados como parâmetro a concentração de sólidos totais (ST), que corresponde a soma da concentração de sólidos suspensos e dissolvidos.

Tabela 2 – Concentração de sólidos após diluição do polímero

Amostra I + solução polimérica	<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 80,5 ppm
	<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 165 ppm
	SÓLIDOS TOTAIS (ST): 245,5 ppm
Amostra II + solução polimérica	<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 179,2 ppm
	<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 224 ppm
	SÓLIDOS TOTAIS (ST): 403,2 ppm
Amostra III + solução polimérica	<b>Concentração de sólidos suspensos:</b> 401,6 ppm
	<b>Concentração de sólidos dissolvidos (&lt;0,45 µm):</b> 161,6 ppm
	SÓLIDOS TOTAIS (ST): 563,2 ppm

## 2.4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

### 2.4.1 Validação da bancada experimental

Inicialmente, foram realizados testes com o objetivo de validar e avaliar a efetividade da bancada experimental. O experimento foi realizado utilizando 20 litros de água de torneira em circuito fechado, realizando diversos passes pela tubulação de teste. Alterando-se a rotação da bomba, faz-se uma varredura no número de Reynolds entre 30.000 e 100.000.

Conhecidos a massa específica ( $\rho$ ), a viscosidade da solução ( $\eta$ ), a velocidade média do escoamento ( $\bar{u}$ ) e com o diâmetro interno da tubulação ( $D$ ), o número de Reynolds foi calculado através da Equação 2.

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\eta}. \quad (2)$$

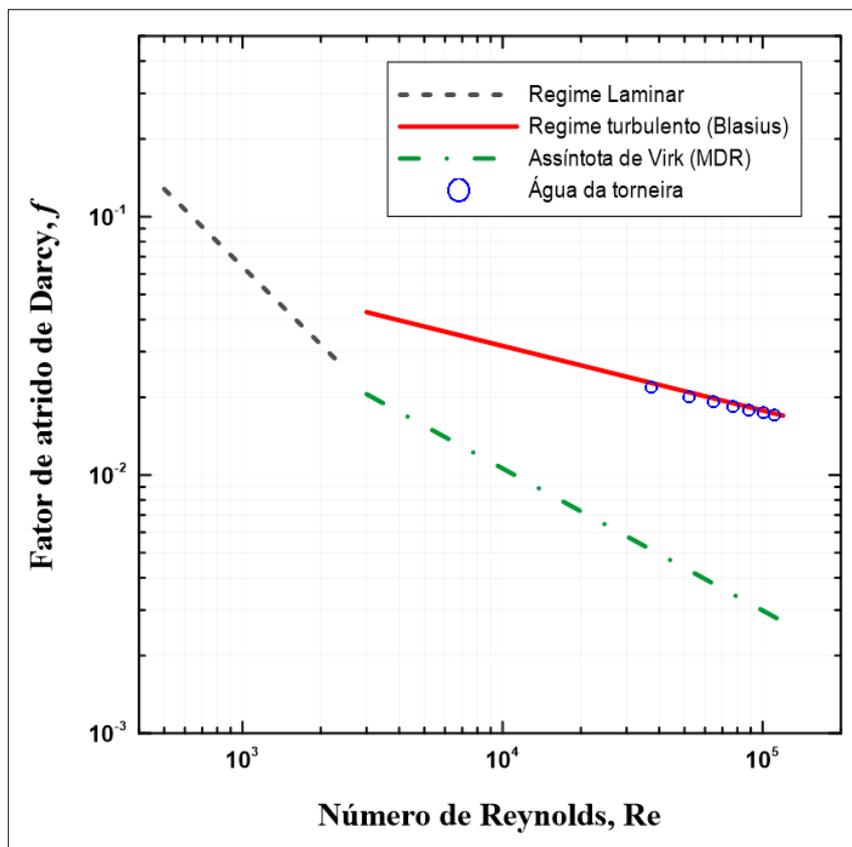
Assumindo o diâmetro constante, e uma vez que a diferença de pressão foi obtida na seção de teste onde o escoamento é desenvolvido, o cálculo do fator de atrito de Darcy da bancada foi realizado pela Equação 3.

$$f_D = \frac{2D}{\rho \bar{u}^2} \left( \frac{\Delta p}{l} \right). \quad (3)$$

Assim, obteve-se uma expressão do fator de atrito experimental da bancada em função do número de Reynolds e em seguida, a expressão foi utilizada para determinar o fator de atrito do solvente e a redução de arrasto. Para validação, os dados do fator de atrito de Darcy obtidos para o escoamento de água da torneira foram comparados aos valores teóricos da correlação de Blasius ( $f_{blasius} = 0,316 * Re^{-0.25}$ ), para tubos lisos.

Na Figura 5, a linha preta tracejada representa o fator de atrito para escoamento em regime laminar ( $f = 64/Re$ ) e a linha vermelha contínua representa o fator de atrito em escoamento turbulento de água em tubo liso, que pode ser obtido pela correlação de Blasius. A linha verde com traço e ponto representa a assíntota de Máxima Redução de Arrasto (MDR), conhecida como lei de Virk ( $f_{virk} = 1,68 * Re^{-0.55}$ ). Por fim, os símbolos (círculos azuis) representam os dados do fator de atrito de Darcy obtidos para o escoamento de água de torneira, que estão bem próximos aos valores teóricos da correlação de Blasius, ambos apresentando uma diferença máxima de 3,5%, demonstrando uma boa precisão do equipamento para o propósito do trabalho. Vale ressaltar que o fator de atrito das amostras de água com particulados é praticamente o mesmo em relação ao obtido na água de torneira. Isso implica que a equação utilizada para determinar o fator de atrito do solvente e, por conseguinte, a redução de arrasto, é a mesma para água com e sem sólidos.

Figura 5 - Teste de validação da bancada experimental



Por mais que os valores experimentais com água da torneira estejam próximos aos teóricos, foi estimada uma expressão do fator de atrito em função do número de Reynolds da bancada experimental, que corresponde aos dados experimentais obtidos com água de torneira, e conseqüentemente, para as amostras de água com sólidos em suspensão. O fator de atrito da bancada experimental é expresso pela Equação 4, que foi utilizada para o cálculo do percentual de redução de arrasto das diferentes soluções estudadas neste trabalho.

$$f_{bancada} = 0,253 \cdot Re^{-0,232} \quad (4)$$

## 2.4.2 Testes com as soluções poliméricas

Os testes foram realizados com os polímeros com concentrações de 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm em água de torneira e em água com sólidos em suspensão com concentrações total de sólidos de 245,5 ppm, 403,2 ppm e 563,2 ppm. Após a preparação das amostras, antes do início de cada teste na bancada experimental,

uma pequena amostra da solução polimérica foi coletada para medir a viscosidade e utilizando um picnômetro calibrado, obtém-se a massa específica de cada solução. As Figuras 6, 7 e 8 mostram os valores de viscosidades das soluções de PEO, Goma Xantana e pó de quiabo, diluídos em água da torneira.

Figura 6 – Viscosidade das soluções com PEO

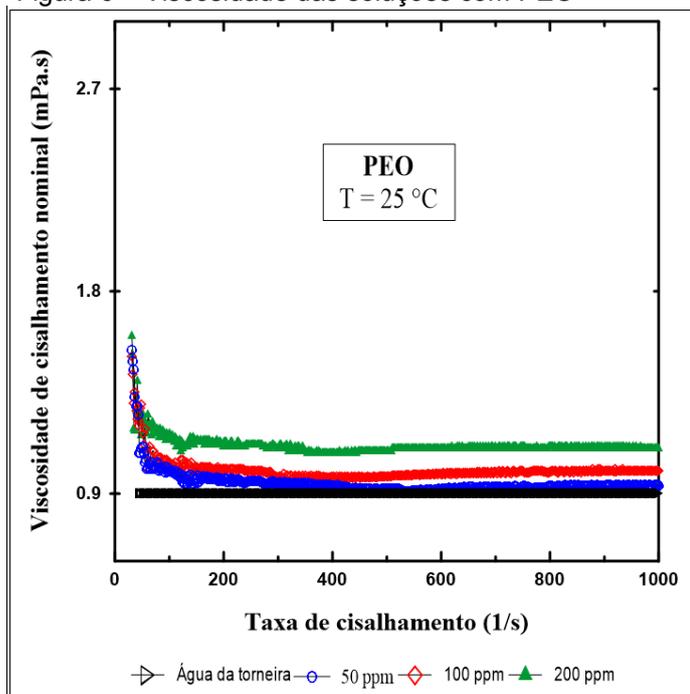


Figura 7 – Viscosidade das soluções com Goma Xantana

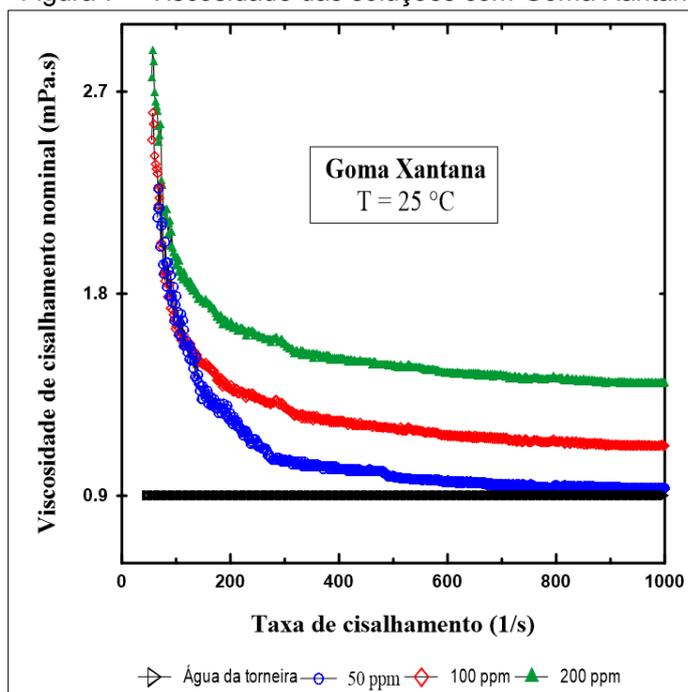
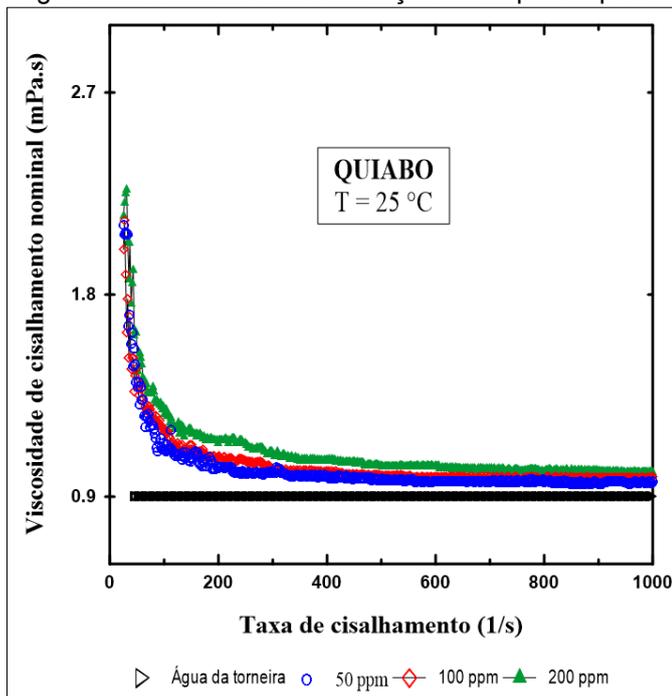


Figura 8 – Viscosidade das soluções com pó de quiabo



Para a medição da viscosidade foi utilizada uma geometria rotativa composta por cilindros concêntricos de dupla folga (*Double Gap DG42*), conectadas a um reômetro AntonPaar Physica MCR501. Para líquidos que apresentam baixa viscosidade a altas taxas de cisalhamento, essa geometria permite obter resultados com exatidão, devido à grande área de contato.

O valor da viscosidade da solução ( $\eta$ ) foi obtido na faixa de rotação do rotor em que o escoamento está em regime laminar. Por apresentarem comportamento afinante (*“shear-thinning”*), para cálculo do número de Reynolds, utilizou-se o valor da viscosidade da região assintótica da curva de escoamento em  $\dot{\gamma} \approx 1000 \text{ s}^{-1}$ . Os testes de viscosidade foram realizados a uma temperatura controlada de 25 °C, que corresponde a temperatura média dos testes de redução de arrasto realizados na bancada.

Uma vez realizada a caracterização reológica do fluido, a partir do esquema apresentado na Figura 3, a solução de teste foi inserida no reservatório da bancada experimental e segue a descrição da subseção 2.1.1. Como se trata de um circuito fechado, não é possível determinar de maneira exata quantas vezes a solução passa pelo circuito. Assim, segundo Costalonga (2017), a partir da vazão volumétrica ( $Q$ ), do tempo de ensaio ( $t_i$ ) e do volume total inicial da solução ( $V$ ) é possível uma estimativa

desse valor, que foi denominado tempo adimensional ( $t^*$ ), e é descrito pela Equação 5.

$$t^* = \frac{Qt_i}{V} \quad (5)$$

### 2.4.3 Análise de Incertezas

A análise de um experimento exige a avaliação da confiabilidade dos valores medidos por meio dos instrumentos. Não é possível encontrar o valor exato de uma grandeza, uma vez que ele só pode ser medido com um instrumento, que sempre tem limitações. Daí a necessidade de associar ao resultado da medição uma estimativa da dispersão dos valores em torno do valor obtido, dada pela incerteza de medição.

A incerteza de medição associada com as estimativas das grandezas de entrada são divididas em dois grupos baseados no método de avaliação: tipo A e tipo B. A avaliação da incerteza padrão do tipo A é o método de avaliar a incerteza por análise estatística de uma série de observações independentes para uma mesma grandeza de entrada nas mesmas condições de medição, enquanto para o tipo B a avaliação é baseada em algum outro conhecimento científico, como por exemplo medições anteriores.

Na maioria dos casos, uma grandeza não é medida diretamente, mas é determinada em função de outras grandezas, através de uma relação funcional. Com exemplo, pode-se expressar o fator de atrito experimental ( $f$ ) como função do diferencial de pressão ( $\Delta p$ ), da distância entre os pontos em que são aferidas as pressões estáticas ( $l$ ), do diâmetro da tubulação ( $D$ ), da massa específica ( $\rho$ ) e da velocidade média do escoamento ( $\bar{u}$ ), conforme apresentado na Equação 3. E a velocidade média ( $\bar{u}$ ), por sua vez, é função da vazão volumétrica ( $Q$ ) e do diâmetro interno do tubo ( $D$ ).

Em geral, a representação padrão de uma grandeza  $x$ , devido às incertezas associadas a cada medição, é dada conforme mostra a Equação 6, em que  $\delta_x$ , por conveniência, é denominado incerteza.

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \delta_x \quad (6)$$

Ainda é comum expressar o valor medido de  $x$  em termos do percentual de incerteza multiplicando a incerteza relativa ( $\delta_x/x$ ) por 100, como mostra a Equação 7.

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \left(\frac{\delta_x}{x}\right) (\%) \quad (7)$$

Desta forma, é possível escrever o fator de atrito na forma da Equação 7, em que a incerteza relativa do fator de atrito pode ser determinada usando o método das séries de Taylor, Equação 8.

$$y_f = \left(\frac{\delta_f}{f}\right) = \left[ k \left(\frac{\Delta p}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta p}\right)^2 \left(\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{l}{f} \frac{\partial f}{\partial l}\right)^2 \left(\frac{\delta_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D}\right)^2 \left(\frac{\delta_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho}\right)^2 \left(\frac{\delta_\rho}{\rho}\right)^2 + 2 \left(\frac{\bar{u}}{f} \frac{\partial f}{\partial \bar{u}}\right)^2 \left(\frac{\delta_{\bar{u}}}{\bar{u}}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Em que os termos  $\left(\frac{\Delta p}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta p}\right)$ ,  $\left(\frac{l}{f} \frac{\partial f}{\partial l}\right)$ ,  $\left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D}\right)$ ,  $\left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho}\right)$  e  $\left(\frac{\bar{u}}{f} \frac{\partial f}{\partial \bar{u}}\right)$  são conhecidos como fatores de ampliação da incerteza para a diferença de pressão, comprimento, diâmetro da tubulação, massa específica e velocidade média do escoamento, respectivamente. Considerando uma confiabilidade de 95 % (fator de abrangência ( $k$ ) = 2), encontra-se um percentual de incertezas de 0,7% ( $(\delta_f/f)_{(\%)}$ ) para os fatores de atrito calculados na bancada experimental.

## 3 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados de redução de arrasto obtidos com a variação da concentração e do tipo de polímero em escoamento turbulento de água com diferentes concentrações de particulados, avaliando o efeito dos sólidos em suspensão na redução de arrasto induzida por polímeros.

### 3.1 EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO E TIPOS DE POLÍMEROS NA REDUÇÃO DE ARRASTO

Os resultados apresentados nesta subseção são obtidos com número de Reynolds constante de 50.000 e a temperatura dos ensaios fixada em 25 °C, para uma tubulação circular com diâmetro interno de 13,7525 mm. Os números entre parênteses mostrados nas legendas dos resultados a seguir indicam repetições dos testes, de modo a conferir maior confiabilidade dos resultados obtidos.

#### 3.1.1 Água de torneira (sem particulados)

O efeito da concentração polimérica foi analisado para 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm. Para todas soluções, como esperado para redução de arrasto através da adição de polímeros, o %DR é uma função crescente 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 Abdulbari e outros (2010, 2011, 2012, 2014) e Coelho e outros (2016). Observou-se que a redução de arrasto atinge um valor máximo, chamado valor máximo do coeficiente de redução de arrasto ( $\%DR_{\text{máx}}$ ), ocorrida no primeiro passe, e decai quando o tempo adimensional é incrementado até atingir o valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto ( $\%DR_{\text{assint}}$ ), em que a degradação ou desagregação polimérica cessa e a distribuição do peso molecular alcança regime permanente.

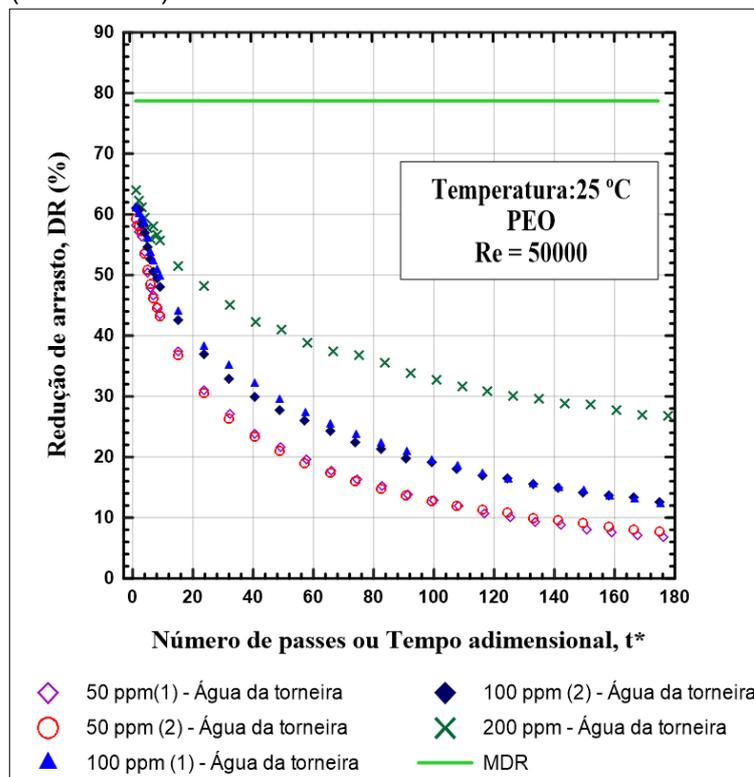
Apesar da diminuição da cadeia polimérica, devido aos rompimentos intermoleculares, o fenômeno de redução de arrasto continua a ser observado, uma vez que as

estruturas menores têm tamanho suficiente para interagir com os vórtices do escoamento turbulento. Observou-se, ainda, que a medida que a concentração aumenta, o  $\%DR_{\text{máx}}$  tende a ficar mais próximo à curva de MDR ou assíntota de Virk que, nesse caso, assume valor próximo a 80% de redução de arrasto, 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.

Para o pó de quiabo, por se tratar de um polímero que apresenta comportamento de material rígido, assim como a Goma Xantana, acredita-se que a perda de eficiência ( $\%DR_{\text{máx}}$  para  $\%DR_{\text{assint}}$ ) não seja causada pela degradação mecânica, mas sim pela desagregação das cadeias poliméricas, como reportado por Soares e outros (2015) em seu estudo com Goma Xantana.

A Figura 9 revela o comportamento em termos de redução de arrasto do Óxido de Polietileno em função do tempo adimensional.

Figura 9 - Efeito da concentração de PEO na água de torneira (sem sólidos)



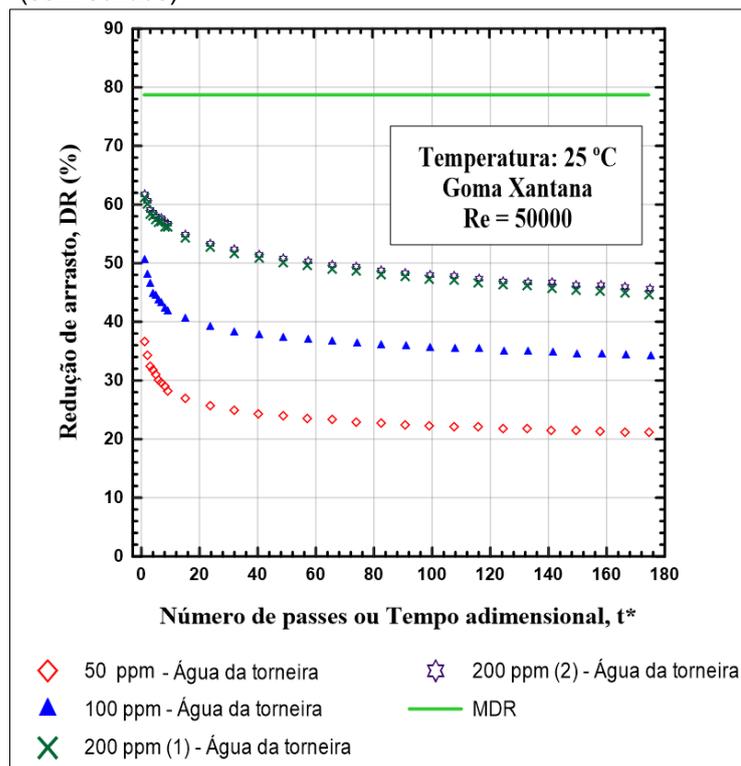
Observa-se que a redução de arrasto da solução mais concentrada de PEO (200 ppm) decai drasticamente do seu valor máximo de 64% para o valor mínimo de 26% como consequência da degradação do polímero, como observado por Soares e outros (2015). Vanapalli, Islam e Solomon (2005) e Soares e outros (2015) também realizaram testes com soluções de PEO de peso molecular médio igual a  $5 \times 10^6$  g/mol. Já Costalonga (2017) realizou testes com PEO de peso molecular médio igual a  $4,6 \times 10^6$  g/mol. Os autores analisaram a perda de eficiência do %DR com aumento do número de passes. O maior resultado do %DR obtido por Vanapalli, Islam e Solomon (2005), no primeiro passe, foi de 75%. Soares e outros (2015) mostraram uma redução de arrasto de 70%. Costalonga (2017) obteve %DR<sub>máx</sub> de 56%. Neste trabalho, o valor máximo do coeficiente de redução de arrasto é de 64%.

A divergência dos resultados obtidos em comparação aos apresentados por Vanapalli, Islam e Solomon (2005) e Soares e outros (2015), ocorre, principalmente, pela presença da bomba utilizada nesta pesquisa, que acelera o processo de degradação do polímero flexível, diminuindo o valor do %DR encontrado, conforme discutido por Costalonga (2017). Além disso, como tem sido observado por outros autores, a redução de arrasto aumenta com o incremento da concentração, massa molecular e número de Reynolds (DEN TOONDER et al., 2005; VANAPALLI; ISLAM; SOLOMON, 2005), e nos primeiros passes o aumento do %DR entre as concentrações é menos evidenciado devido à proximidade da MDR. Em relação aos resultados apresentados por Costalonga (2017), a diferença dos resultados ocorre devido à diferença da massa molecular do polímero em estudo e do número do Reynolds (nesta pesquisa é utilizado número de Reynolds 67% maior).

Os resultados obtidos para Goma Xantana, Figura 10, são qualitativamente semelhantes aos apresentados para o PEO, ou seja, o aumento da concentração de polímeros provoca supressão de maior quantidade de vórtices turbulentos, reduzindo o fator de atrito da solução e, por consequência, aumenta o %DR. O valor máximo do %DR para a concentração de 200 ppm de XG, em  $t^* = 1$ , foi de 61%, enquanto para o PEO foi de 64%. Entretanto, o valor assintótico da solução com XG é superior, conforme discutido por Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares e outros (2015). Os autores acreditam que a perda de eficiência nas soluções com XG (%DR<sub>máx</sub> para %DR<sub>assint</sub>) não seja causada pela degradação mecânica, como ocorre nas soluções

com PEO, mas sim pela desagregação das cadeias poliméricas. Conseqüentemente, a redução de arrasto cai mais rapidamente para as para as soluções com XG, e depois se mantém praticamente constante até o final do teste, fato também observado e discutido por Costalonga (2017).

Figura 10 - Efeito da concentração de XG na água de torneira (sem sólidos)

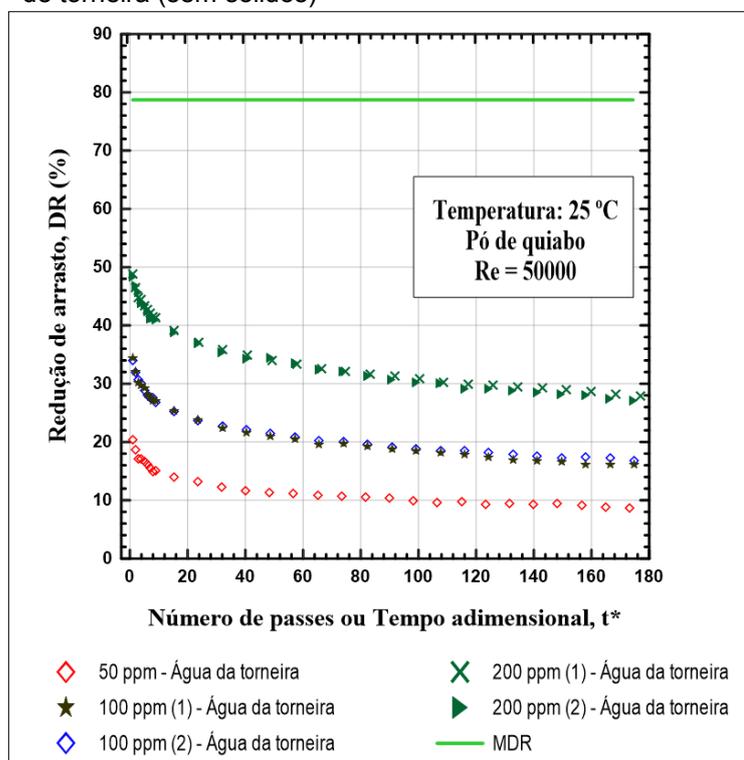


Soares e outros (2015) também realizaram testes com Goma Xantana de peso molecular médio igual a  $2 \times 10^6$  g/mol. O resultado do %DR obtido pelos autores para 200 ppm, no primeiro passe, é de aproximadamente 51%. O %DR<sub>máx</sub>, para a referida concentração, obtida nesta pesquisa é de 61%, conforme apresentado na Figura 10. No trabalho dos pesquisadores, os testes são realizados com número de Reynolds muito semelhante ao deste trabalho. Todavia, segundo Loureiro, Silva e Klippel (2011), a redução de arrasto é reduzida pelo aumento do diâmetro do tubo. Portanto, essa diferença nos resultados apresentados em relação àqueles da literatura pode ser explicada, principalmente, pela diferença do diâmetro da tubulação das bancadas experimentais. No trabalho de Soares e outros (2015) os testes são realizados com o diâmetro da tubulação da seção de testes 18,9% maior que o deste trabalho. A respeito da influência da bomba centrífuga na redução de arrasto para soluções de

PEO, PAM e XG, Soares e outros (2015) concluíram que, por apresentarem comportamento de material rígido, as moléculas de Goma Xantana não são afetadas tão significativamente como os polímeros flexíveis PEO e PAM.

A Figura 11 retrata o comportamento em termos de redução de arrasto do pó de quiabo em função do tempo adimensional, em que se observa que o aumento da concentração proporciona maiores valores de redução de arrasto, qualitativamente semelhante aos resultados apresentados para o PEO e XG.

Figura 11 - Efeito da concentração de pó de quiabo na água de torneira (sem sólidos)



Coelho e outros (2016) conduziram experimentos com o mesmo pó de quiabo utilizado nesta pesquisa. Os valores máximos e assintóticos dos coeficientes de redução de arrasto obtidos no presente trabalho apresentam divergência em relação aos resultados do trabalho citado, em que o  $\%DR_{m\acute{a}x}$  relatado para 200 ppm, por exemplo, foi por volta de 26%. Neste trabalho, o  $\%DR_{m\acute{a}x}$  para a referida concentração foi de 49%. Entretanto, no trabalho de Coelho e outros (2016), os testes são realizados com número de Reynolds 69% maior do que o deste trabalho e com o diâmetro da tubulação da seção de teste 18,9% maior.

Abdulbari, Ahmad e Yunus (2010) avaliaram os efeitos da variação de diâmetro, concentração de polímero e número de Reynolds na redução de arrasto induzida por mucilagem de quiabo. Segundo os autores, o coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%DR) foi reduzido pelo aumento do diâmetro do tubo devido às mudanças nos meios de turbulência com os quais o redutor de arrasto interage. Ainda, analisando o comportamento do %DR *versus* Re em diferentes concentrações do aditivo (mucilagem de quiabo), apresentaram resultados contra intuitivos, ou seja, verificou-se que o aumento do número de Re resultou em uma diminuição do %DR em comparação com o valor máximo.

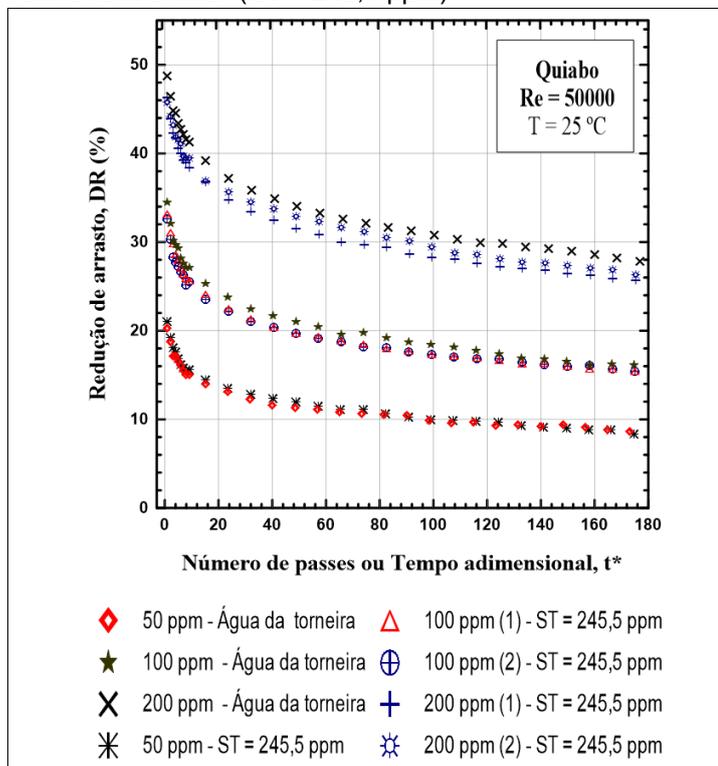
### **3.1.2 Água com partículas sólidas em suspensão**

No intuito de se compreender o efeito da concentração sólidos presentes nas águas de mananciais na variação da redução de arrasto com o tempo, são apresentados os resultados do %DR para a primeira amostra de água com particulados. Essa amostra, retirada diretamente de represa usada para captação de água para uso em sistema de irrigação, utilizada como solvente, tem composição final, 80,5 ppm de sólidos em suspensão e 165 ppm de sólidos dissolvidos, totalizando 245,5 ppm de particulados presentes na solução. Vale notar que os resultados apresentam a mesma tendência daqueles expostos nas Figuras 9, 10 e 11, ou seja, para todos os polímeros, a eficiência na redução de arrasto cresce com o aumento da concentração da solução e cai com o aumento do tempo adimensional.

As Figuras a seguir mostram a redução de arrasto para as soluções poliméricas diluídas em água de torneira e em água com sólidos suspensos com concentração total de sólidos de 245,5 ppm. A Figura 12, por exemplo, retrata a influência dos particulados na redução de arrasto proporcionada pelo pó de quiabo. A solução mais concentrada de pó de quiabo (200 ppm), para água com sólidos suspensos (ST = 245,5 ppm), apresenta um valor máximo de redução de arrasto de 46% e chega no limite assintótico com %DR por volta de 26%, devido à desagregação das moléculas, conforme já discutido. Comparando estes valores com aqueles encontrados para água sem particulados, é possível verificar que houve uma ligeira variação na redução de arrasto, desde os instantes iniciais até a região assintótica. Entretanto, para as menores concentrações, 50 e 100 ppm, não foi observada variações nas curvas de

redução de arrasto para as soluções com particulados, quando comparadas ao solvente puro.

Figura 12 – Efeito da concentração de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm)



Ainda em relação ao efeito dos sólidos, a Figura 13 mostra que não há grande influência dos particulados na curva de redução de arrasto para o PEO, uma vez que as curvas para água de torneira e água com sólidos em suspensão, para uma mesma concentração, são muito próximas. O mesmo pode ser observado para as soluções de XG, conforme apresentado na Figura 14. Desta forma, para a referida concentração de sólidos, os polímeros utilizados nesta pesquisa podem ser satisfatoriamente diluídos nesse solvente sem perda da eficiência na redução de arrasto.

Figura 13 – Efeito da concentração de PEO em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm)

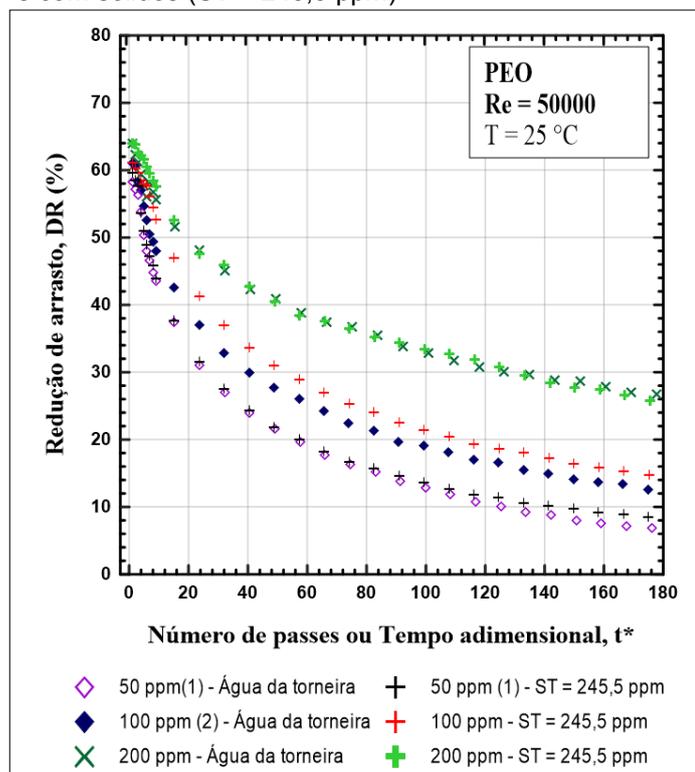
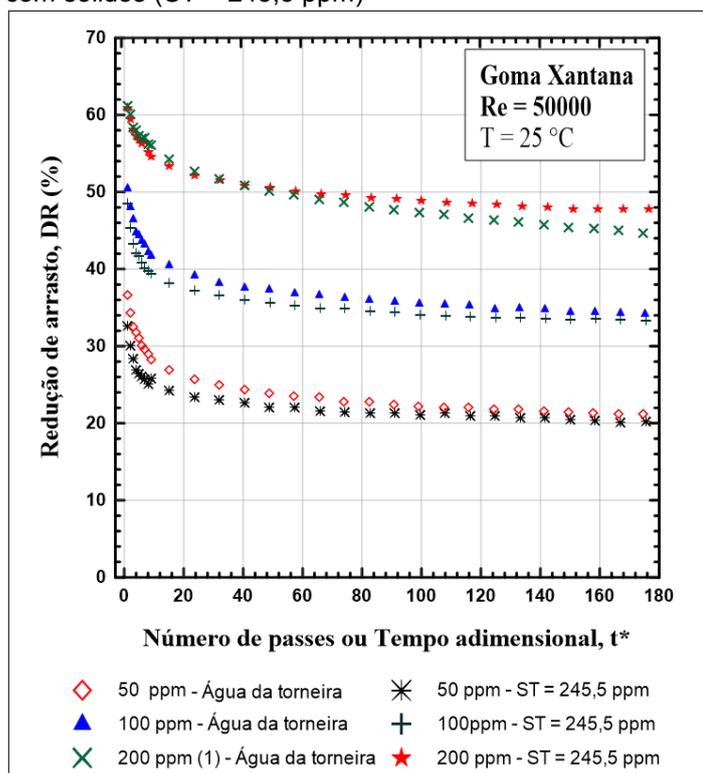


Figura 14 – Efeito da concentração de XG em água sem e com sólidos (ST = 245,5 ppm)

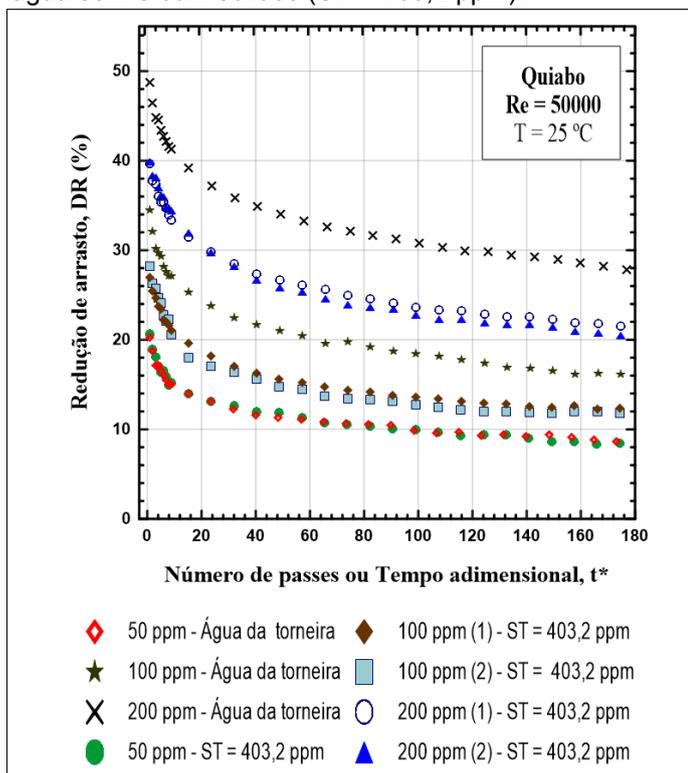


Os resultados do %DR para as soluções de pó de quiabo, PEO e XG na segunda amostra de água com sólidos em suspensão utilizada como solvente são apresentados a seguir. A água em estudo, apresenta composição final, 179,2 ppm de sólidos em suspensão e 224 ppm de sólidos dissolvidos, totalizando de 403,2 ppm de particulados presentes na solução polimérica em análise.

Para todos os resultados com particulados, observa-se a mesma tendência daqueles expostos nas Figuras 9, 10 e 11, ou seja, a redução de arrasto aumenta com incremento da concentração polimérica. Além disso, uma maior redução de arrasto é evidenciada no primeiro passe, para cada concentração, e decai até o limite assintótico.

As Figuras a seguir comparam em termos de redução de arrasto as soluções poliméricas diluídas em água de torneira e em água com sólidos suspensos com concentração total de sólidos de 403,2 ppm. De acordo com Figura 15, por exemplo, o %DR<sub>máx</sub> para solução com pó de quiabo com concentração de 200 ppm, em água de torneira, foi de 49%.

Figura 15 – Efeito da concentração de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm).



Com o incremento do tempo adimensional ocorre a desagregação das moléculas, causando considerável perda de eficiência do aditivo atingindo o valor assintótico de 28%. Já na água com sólidos em suspensão, com concentração total de sólidos de 403,2 ppm, o  $\%DR_{máx}$ , em  $t^* = 1$ , foi de 39% caindo para 21% ao longo do experimento. Para concentração de 100 ppm do referido polímero, na água de torneira, o nível de eficiência máxima é de 34% e decai para 17%. No entanto, para testes utilizando água com sólidos como solvente, o  $\%DR$  caiu de 27% para 12%. Porém, nenhuma alteração significativa é observada para concentração de 50 ppm em água de torneira em relação a água com particulados como solventes.

Acredita-se que a queda de eficiência do polímero em algumas soluções com particulados esteja associado a característica flocculante do quiabo, devido a interação entre o polímero e os sólidos presentes na água de estudo. Segundo Lima (2007), o quiabo é a forma mais simples para aplicação como polímero natural em tratamento de água e esgoto como auxiliar de floculação. Assim sendo, de acordo com Povkh e Stupin (1972), estruturas floculares que precipitam a partir da solução pode provocar perda do amortecimento do arraste hidráulico, diminuindo o efeito de redução de arrasto.

Para as soluções de PEO, Figura 16, foram observadas pequenas variações nas curvas de redução de arrasto em função do tempo adimensional para solvente com e sem sólidos. Embora não seja algo muito significativo, há um ligeiro aumento do  $\%DR$  na solução com particulados, o que demonstra que o polímero em questão apresenta boa eficiência neste solvente.

Já para as soluções de XG, Figura 17, observa-se uma ligeira diminuição no  $\%DR$  nos instantes iniciais para a concentração de 50 ppm de polímero, quando comparada a eficiência em água de torneira, porém, ao longo do experimento, se equiparam as qualidades dos solventes. Para a concentração de 200 ppm, nos instantes iniciais, não há alteração nas curvas de redução de arrasto para os diferentes solventes, entretanto, a região assintótica apresenta ligeiro aumento no  $\%DR$  para água com sólidos em suspensão. Mas, de forma geral, o solvente com particulados, na referida concentração de sólidos, não compromete a eficiência do agente redutor de arrasto.

Figura 16 – Efeito da concentração de PEO em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm)

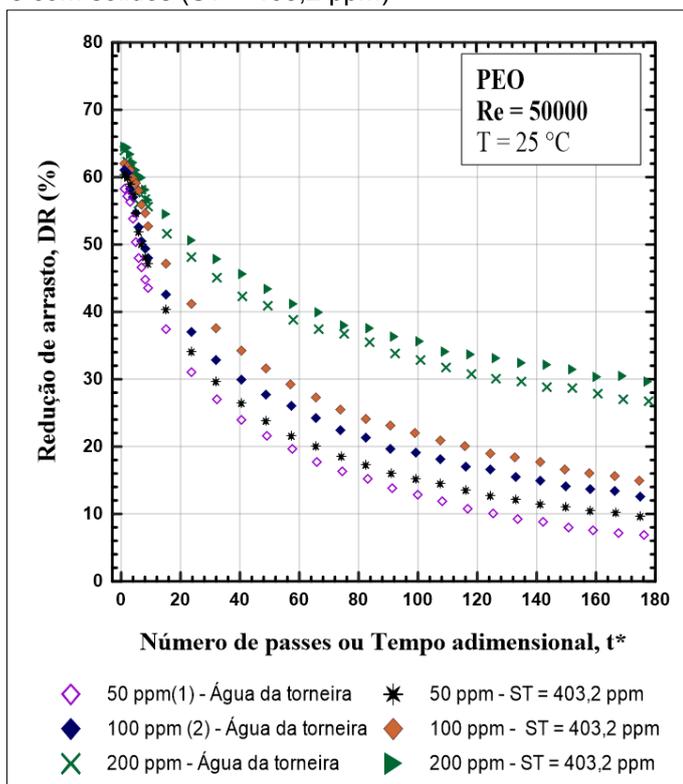
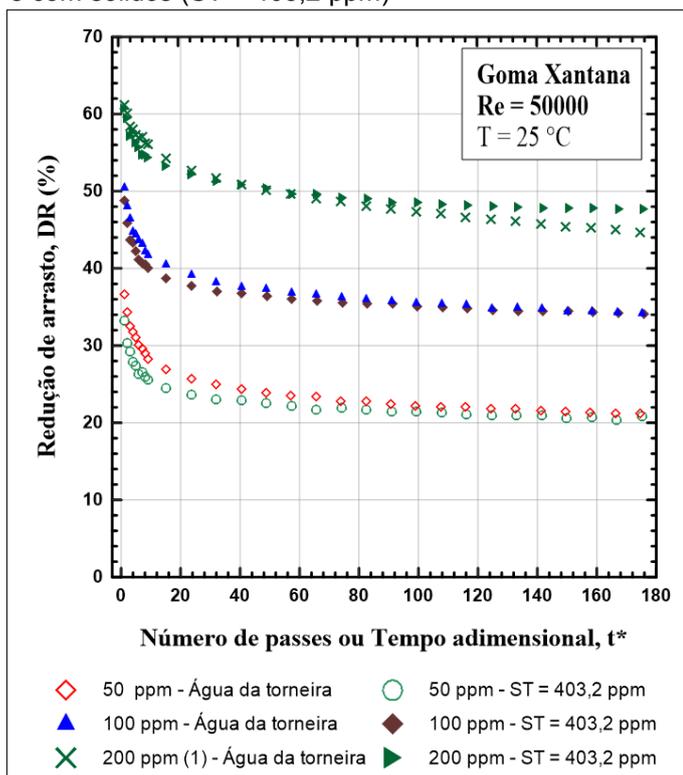


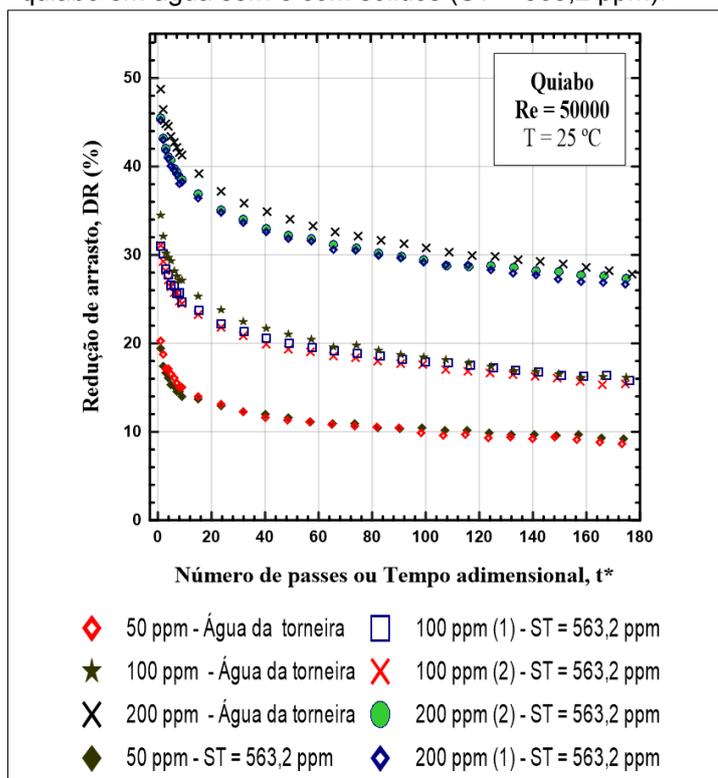
Figura 17 – Efeito da concentração de XG em água sem e com sólidos (ST = 403,2 ppm)



Também foi testada uma terceira amostra de água com sólidos em suspensão que na solução polimérica apresenta 401,6 ppm de sólidos em suspensão e 161,6 ppm de sólidos dissolvidos, constituindo 563,2 ppm de particulados presentes na solução final de teste. Para todos os casos, como nos resultados anteriores, o %DR vai se tornando menos evidente ao longo do experimento, até atingir seu valor assintótico.

As Figuras a seguir comparam a redução de arrasto para as soluções poliméricas diluídas em água sem particulados e em água com sólidos em suspensão, com concentração total de sólidos de 563,2 ppm. Para o pó de quiabo (Figura 18), embora que esta terceira amostra de água com sólidos em suspensão tenha concentração de sólidos maior do que a segunda água com particulado, não houve variação significativa do %DR para as concentrações de polímeros e sólidos utilizados no presente trabalho quando comparada a água de torneira como solvente.

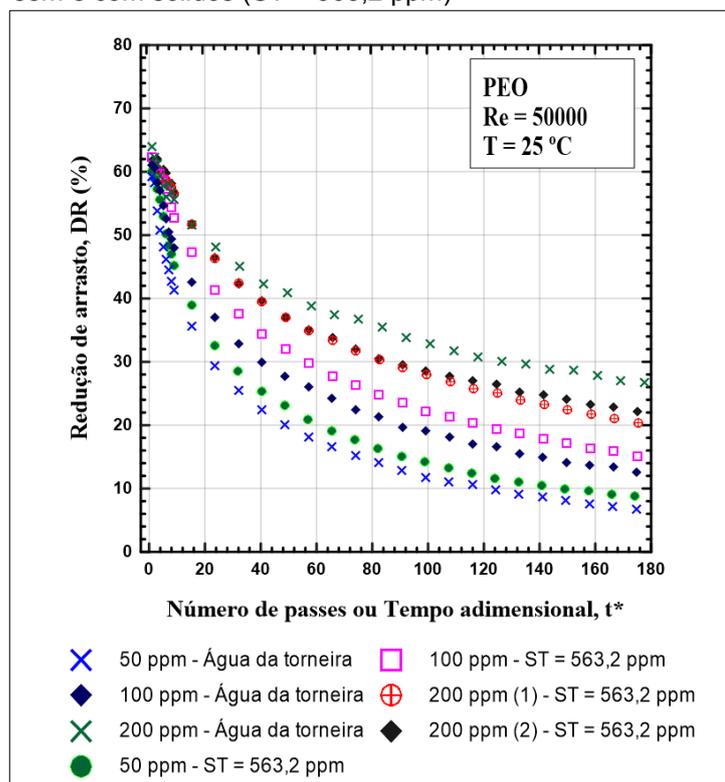
Figura 18 - Redução de arrasto em solução de pó de quiabo em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm).



Em relação as soluções com PEO (Figura 19), para a concentração de 200 ppm em água de torneira, obteve-se uma redução de arrasto de 64%, no primeiro passe,

decaindo para o limite assintótico de 27%. Utilizando a água com sólidos como solvente, para a referida concentração polimérica, a solução apresenta uma redução de arrasto de 60% e decai para 20%, alcançando seu valor mínimo. Desta forma, observa-se uma ligeira influência dos sólidos na degradação do polímero, principalmente, para a maior concentração de polímero utilizada nesta pesquisa.

Figura 19 - Redução de arrasto em solução de PEO em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm)

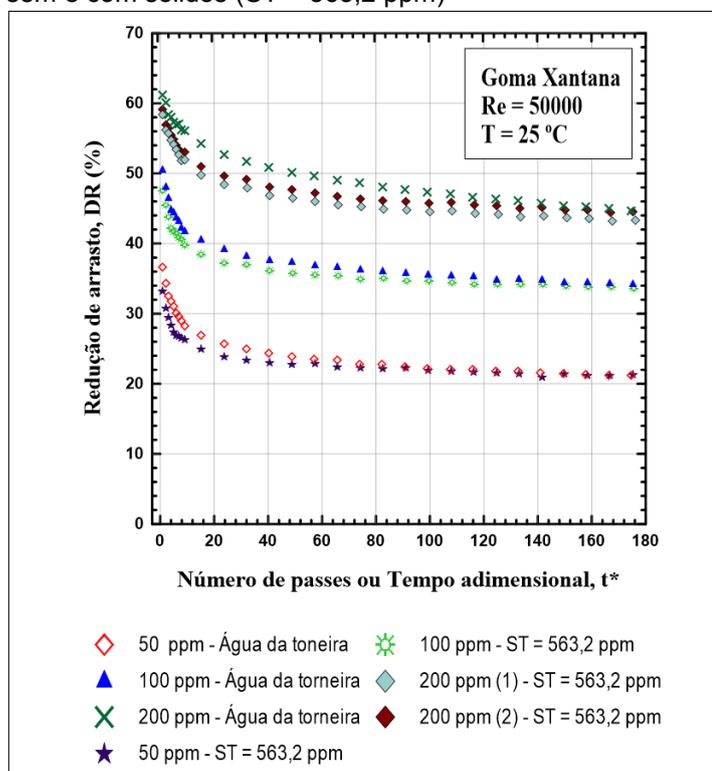


Segundo Zakin e Hunston (1978), o solvente afeta a degradação do polímero, de modo que em um mau solvente, a degradação é mais rápida do que em um bom solvente. Para as menores concentrações de 50 e 100 ppm não foram evidenciadas variações significativas nas curvas de redução de arrasto em função do tempo adimensional para solvente com e sem sólidos.

Já para Goma Xantana (Figura 20), para todas as concentrações houve uma ligeira diminuição no  $\%DR_{máx}$ , em  $t^* = 1$ , ou seja, no primeiro passe. Resultados experimentais obtidos por Elbing e outros (2009) e Kamel e outros (2009) em escoamento em dutos sugerem que mau solvente atrasa o início da redução de

arrasto e reduz o pico máximo da redução de arrasto atingido, em comparação com a água pura.

Figura 20 - Redução de arrasto em solução de XG em água sem e com sólidos (ST = 563,2 ppm)



Para a maior concentração de XG (200 ppm) observa-se uma queda mais acentuada no %DR nos primeiros instantes dos testes quando comparados aos resultados obtidos com água de torneira. Para as demais concentrações, assim como nos casos anteriores, a presença dos sólidos na solução não influenciou tão significativamente o fenômeno de redução de arrasto, sendo equiparável ao observado em água sem particulados.

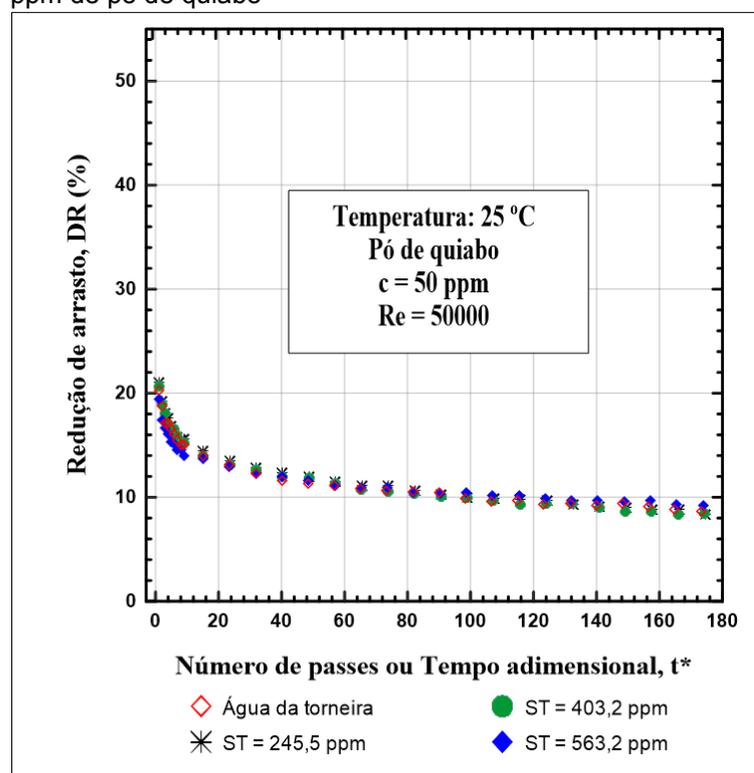
### 3.2 EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NA REDUÇÃO DE ARRASTO

Nesta seção são contrapostos os resultados do %DR obtidos para água de torneira (sem particulados) e em amostras de água com diferentes concentrações de sólidos.

As Figuras a seguir mostram o efeito da concentração de sólidos para as concentrações de 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm de pó de quiabo, respectivamente.

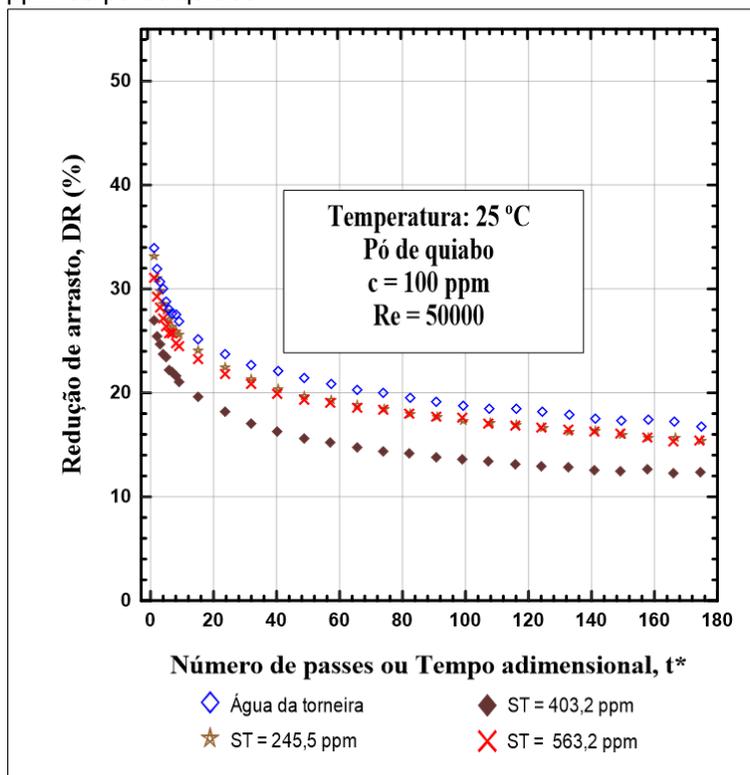
Ao analisar os resultados para a concentração de 50 ppm de polímero (Figura 21), observa-se que o aumento da concentração de particulados no solvente não altera a eficiência do polímero em termos de redução de arrasto, desde o  $\%DR_{\text{máx}}$ , obtido no primeiro passe, até o limite assintótico ( $\%DR_{\text{assint}}$ ).

Figura 21 - Efeito da concentração de sólidos no  $\%DR$  em 50 ppm de pó de quiabo



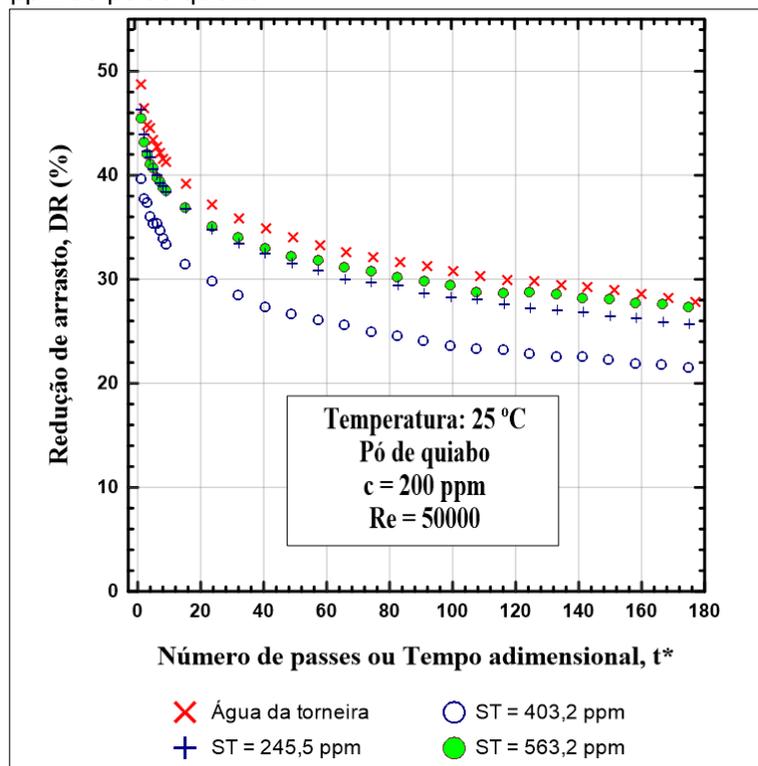
Para a concentração de 100 ppm (Figura 22), o  $\%DR_{\text{máx}}$  cai de 34% para 17% na região assintótica, usando água de torneira como solvente. Para concentração de sólidos de 245,5 ppm não é evidenciada a influência dos particulados no  $\%DR$  induzido pelo polímero, decaindo de 33% para 15%. Já para a concentração de 403,2 ppm a variação ocorre de 27% para 12%, o que demonstra ligeira queda na eficiência do polímero devido a presença dos particulados. Uma vez aumentada a concentração de sólidos para 563,2 ppm, é observada novamente a queda no fator de atrito da solução, e conseqüentemente, aumento no  $\%DR$ , aproximando ao nível de eficiência dos DRA em solução pura (sem particulados).

Figura 22 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de pó de quiabo



Para a concentração de 200 ppm do polímero (Figura 23) o %DR<sub>máx</sub> cai de 49% para 28% na região assintótica, usando água de torneira como solvente. Para concentração de sólidos de 245,5 ppm ocorre uma ligeira queda de eficiência decaindo de 46% para 25%. Já para a concentração de 403,2 ppm a variação ocorre de 39% para 21%. Uma vez aumentada a concentração de sólidos para 563,2 ppm, é observada novamente a queda no fator de atrito da solução, e conseqüentemente, aumento no %DR, aproximando ao nível de eficiência dos DRA em solução pura (sem particulados).

Figura 23 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de pó de quiabo

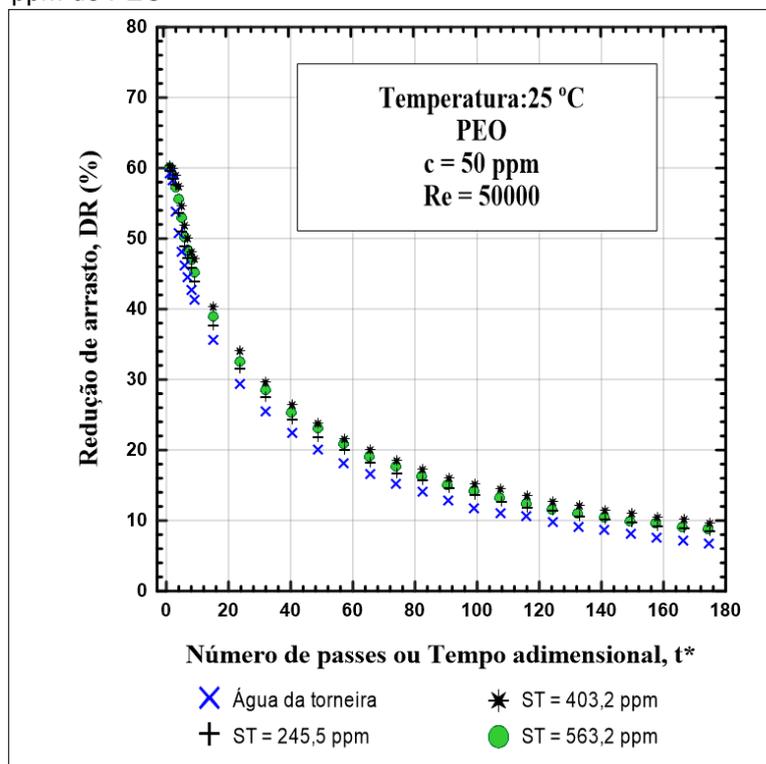


Devido à presença de particulados, para grandes concentrações de sólidos, espera-se que a redução de arrasto se torne menos evidente à medida que ocorre o incremento de sólidos, como retratado por Povkh e Stupin (1972) e Golda (1986), que utilizaram como fase sólida areia, cinzas, carvão e argila.

Entretanto, nesta pesquisa são utilizadas concentrações de sólidos bem menores que as dos autores acima citados, devido as características das águas de mananciais. Acredita-se que para a concentração de sólidos de 403,2 ppm, ocorra maior interação entre o polímero e os particulados presentes na solução polimérica com 100 e 200 ppm de pó de quiabo, uma vez os polímeros podem ser fortemente adsorventes ou floculantes dependendo da relação entre o polímero e os sólidos em suspensão, comprometendo a eficiência do agente redutor de arrasto, conforme reportado por Sellin (1989). Além disso, para o caso de aditivos poliméricos floculantes (como é o caso do quiabo), acredita-se que os mesmos possam adsorvidos na superfície de sólidos. Esta adsorção leva a uma diminuição da concentração efetiva de polímero no tubo e uma diminuição na redução do arrasto (GOLDA, 1986).

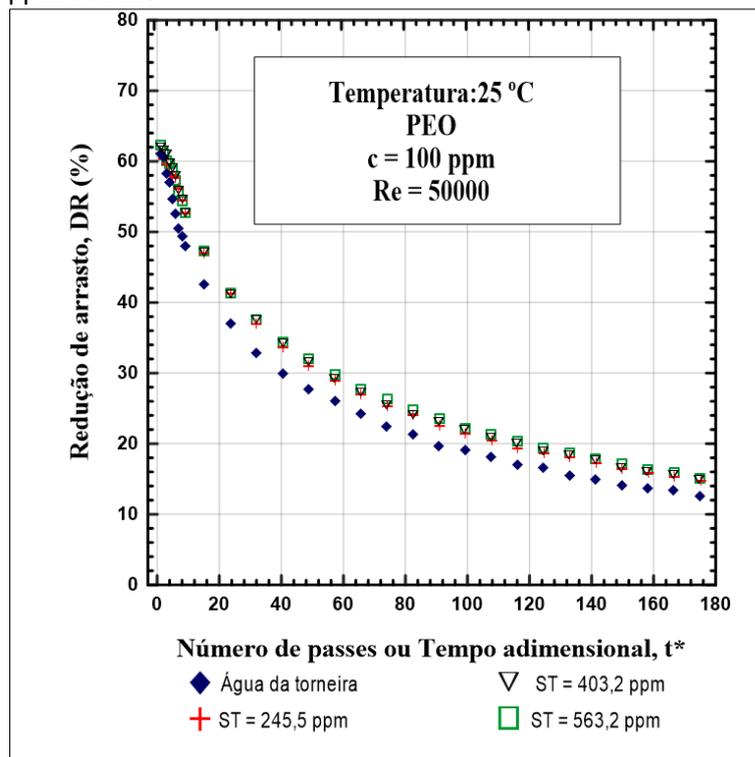
As Figuras a seguir mostram a comparação dos resultados obtidos utilizando PEO com concentrações de 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm, respectivamente, em água com diferentes concentrações de particulados. Assim como acontece nos resultados apresentados para o pó de quiabo, para a concentração de 50 ppm (Figura 24), não há alteração nas curvas de redução de arrasto com incremento da concentração de particulados ao solvente.

Figura 24 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 50 ppm de PEO



Utilizando-se 100 ppm do polímero (Figura 25), para todos os testes utilizando como solventes água com sedimentos, houve um ligeiro aumento no %DR, sendo equiparável para todas as concentrações de sólidos. Porém, as curvas de redução de arrasto ainda se apresentam bem próximas as das águas sem particulados.

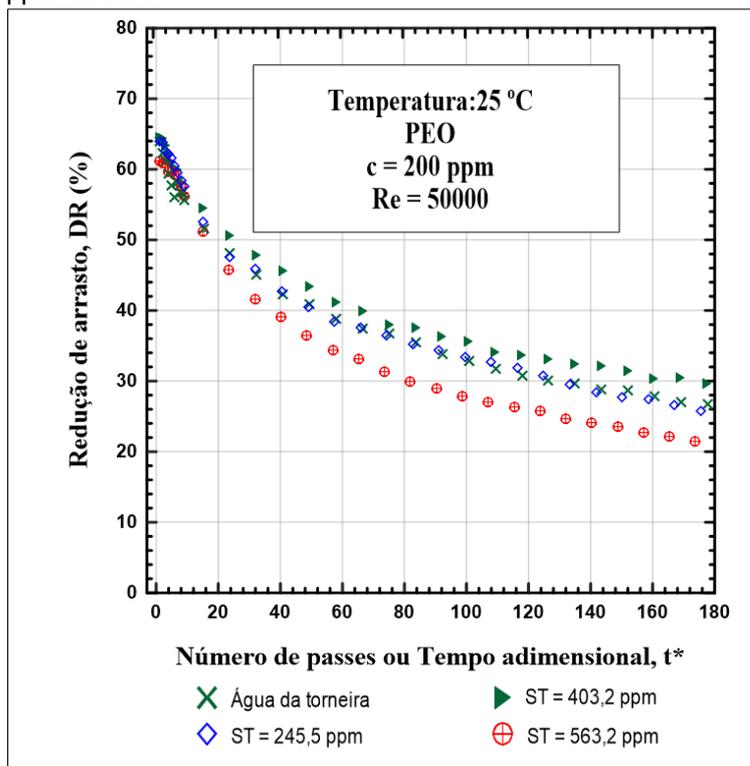
Figura 25 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de PEO



Já para 200 ppm (Figura 26), para concentração de 245,5 ppm de sólidos, a curva de redução de arrasto é praticamente a mesma da solução pura. Um adicional de sólidos, concentração de 403,2 ppm, sugere um pequeno aumento no %DR da região assintótica. Porém, ao aumentar a concentração de soluto para 563,2 ppm, há uma queda de eficiência do DRA tanto no %DR<sub>máx</sub>, em t\* = 1, quanto na região assintótica. Os resultados demonstram que para a concentração de 200 ppm do polímero, na água carregada de sedimentos com concentração de 563,2 ppm, o %DR decai de 61% para 21% na região assintótica.

Todavia, para o solvente sem particulados, o %DR<sub>máx</sub> decai de 64% para 27%, revelando que os sólidos presentes no solvente compromete a eficiência do polímero na redução do arrasto hidráulico, sobretudo na região assintótica. Resultados experimentais em escoamento em dutos sugerem que mau solvente atrasa o início da redução de arrasto e reduz o pico máximo da redução de arrasto atingido, em comparação com a água pura (ELBING et al., 2009; KAMEL et al., 2009), além de afetar a degradação do polímero, uma vez que em um mau solvente, a degradação é mais rápida do que em um bom solvente (ZAKIN; HUNSTON, 1978).

Figura 26 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de PEO



Nas Figuras a seguir são feitas as comparações dos resultados do %DR em função do tempo adimensional para escoamento turbulento em duto com e sem particulados, utilizando Goma Xantana como agente redutor de arrasto. Como acontece nos resultados apresentados para o pó de quiabo e PEO, para a concentração de 50 ppm (Figura 27), as curvas de redução de arrasto apresentam-se bem próximas para todas as concentrações de sólidos, apresentando apenas uma pequena queda de eficiência nas primeiras passes para os solventes com particulados. O mesmo é observado para 100 ppm do polímero (Figura 28), em que para todos os casos, é verificado que as curvas de redução de arrasto são muito próximas, o que demonstra que os sólidos presentes nos solventes não tem interferência significativa no fenômeno em análise.

Figura 27 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 50 ppm de XG

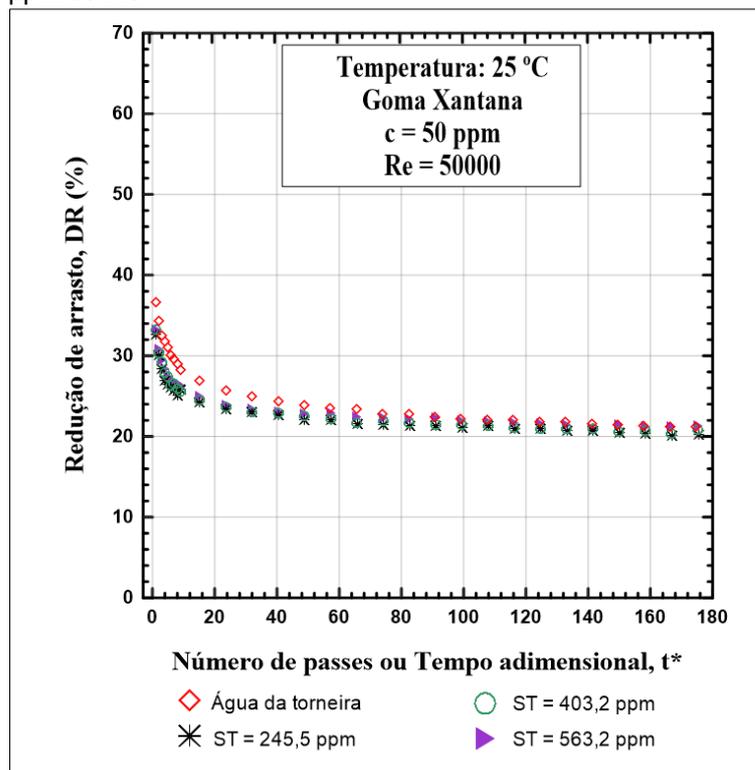
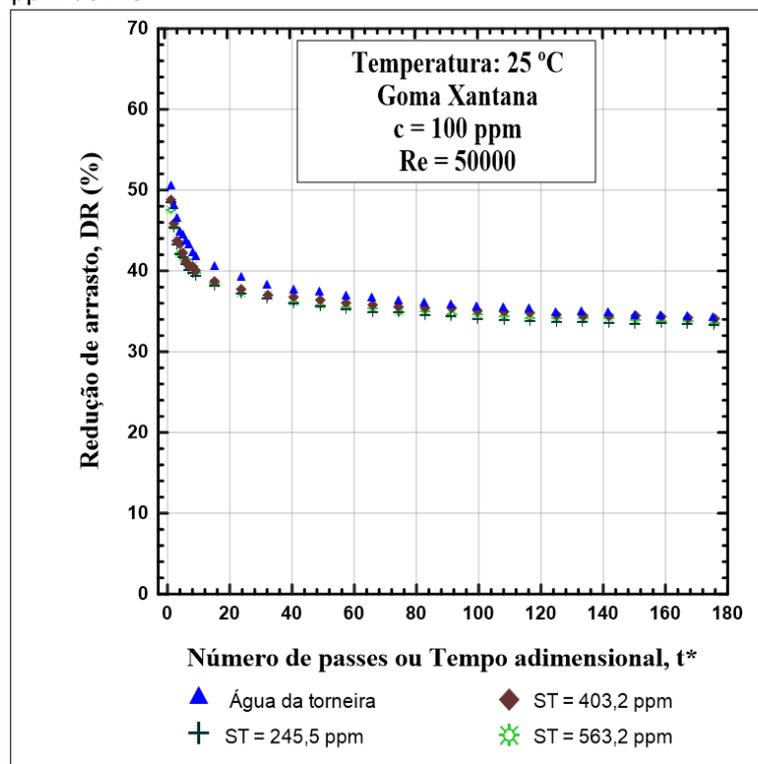
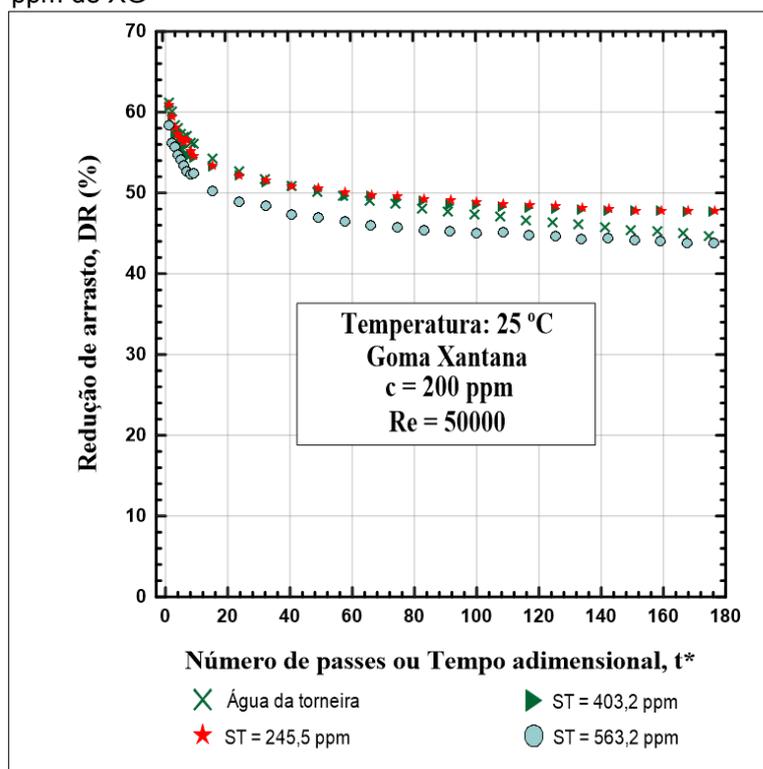


Figura 28 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 100 ppm de XG



Na Figura 29, observa-se que para as soluções com 200 ppm de Goma Xantana, a presença de particulados na água até a concentração de 403,2 ppm apresentam resultados de redução de arrasto semelhantes aos obtidos em água da torneira, mas com pequeno aumento no %DR na região assintótica. O incremento da concentração de particulados no solvente para 563,2 ppm proporciona uma queda de eficiência do DRA no %DR<sub>máx</sub> e nos instantes iniciais da redução de arrasto, se equiparando ao longo do teste aos resultados obtidos por água pura na região assintótica. De forma geral, os resultados evidenciam que a água carregada de sedimentos com concentração de até 563,2 ppm não compromete de forma significativa a eficiência do polímero na redução do arrasto hidráulico, quando comparado aos resultados obtidos na água sem particulados.

Figura 29 - Efeito da concentração de sólidos no %DR em 200 ppm de XG



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou experimentalmente a redução de arrasto em escoamentos turbulentos em dutos por adição de polímeros rígidos e flexíveis em solução carregada de sedimentos. Os testes foram realizados utilizando soluções aquosas de pó de quiabo (constituído de fibras e polímero natural do quiabo), Óxido de Polietileno (PEO) e Goma Xantana (XG). Usou-se concentrações de 50 ppm, 100 ppm e 200 ppm, utilizando como solventes, além da água de torneira (sem sólidos), águas com concentração total de sólidos (suspensos + dissolvidos) igual a 245,5 ppm, 403,2 ppm e 563,2 ppm para cada agente redutor de arrasto, avaliando o efeito dos sólidos em suspensão na redução de arrasto induzida por polímeros, através dos resultados obtidos em função da redução de arrasto pelo tempo adimensional ( $t^*$ ), que está relacionado ao número aproximado de vezes que a solução de teste (volume inicial) passa pelo circuito experimental.

Para todos os aditivos e solventes utilizados, foi observado que os valores do %DR aumentam com o aumento da concentração polimérica e diminuem com o incremento do tempo adimensional. Nota-se que a presença de particulados nos solventes não altera significativamente o comportamento dos polímeros PEO e XG, para todas as concentrações de polímeros e particulados utilizados neste trabalho. Porém, para o pó de quiabo (100 e 200 ppm), para concentrações de sólidos de 403,2 ppm, ocorre perda significativa da eficiência do polímero na redução de arrasto. Todavia, um adicional de sólidos (563,2 ppm) ao referido polímero, provoca o amortecimento da turbulência e diminuição do fator de atrito, voltando a se equiparar ao observado para solução pura. Acredita-se que, para algumas concentrações, pode estar havendo alguma interação diferente entre o polímero e os sólidos e que precisa ser melhor investigado em trabalho futuro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULBARI, H. A.; YUNUS, R. B.M. “Drag Reduction Improvement in Two Phase Flow System Using Traces of SLES Surfactant”, Asian Journal of Industrial Engineering, vol. 1, pp. 1-11, 2009.

ABDULBARI, H. A.; AHMAD M. A.; 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.

ABDULBARI, H. A.; KAMARULIZAM, S. N.; 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.

ABDULBARI, H. A.; KAMARULIZAM, N. S.; 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.

ABDULBARI, H. A.; SHABIRIN, A.; 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.

ANDRADE, R. M.; PEREIRA, A. S.; 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.

ANDRADE, R. M.; PEREIRA, A. S.; 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.

BAILEY, F. E.; KOLESKE, J. V. “Poly(ethylene oxide)”. Academic Press Inc., 1976.

BARBOSA, K. C. O. “Estudo da Mucilagem e Fibra Natural da Babosa (aloe Vera) como Redutores de Arrasto em escoamentos Turbulentos”. 2017. 86p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Espírito Santo, 2017.

BEWERSDORFF, H. W.; SINGH, R. P. “Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions”, Rheologica Acta, vol. 27, pp. 617–627, 1988.

BEWERSDORFF, H. W.; BERMAN, N. S. "The influence of flow-induced non-Newtonian fluid properties on turbulent drag reduction", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 130-136, 1988.

BEWERSDORFF, H. W.; SINGH, R. P. "Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 617-627, 1988.

BEWERSDORFF, H.W.; BERMAN, N.S. "The influence of flow-induced non-Newtonian fluid properties on turbulent drag reduction", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 130-136, 1988.

BIZOTTO, V. C.; SABADINI, E. "Poly(ethylene oxide) x polyacrylamide. Which one is more efficient to promote drag reduction in aqueous solution and less degradable", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 25, pp. 1844–1850, 2008.

BOOTH, R. B. "Coal suspension pumping using polyelectrolytes", *US Patent Specifications*, vol. 3, pp. 524-682, 1970.

BURGER, E. D.; 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.

CHEN, X. et al. "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.

CHOI, H. J.; JHON, M. S. "Polymer-induced turbulent drag reduction", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 35, pp. 2993–2998, 1996.

CHOI, H. J. et al. "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 69, pp. 341–346, 2000.

CHOI, H. J. et al. "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction", *Polymer Degradation and Stability*, vol. 69, pp. 341–346, 2000.

COELHO, E. C. et al. "Okra as a drag reducer for high Reynolds numbers water flows", *Rheologica Acta*, vol. 55, pp. 983-991, 2016.

COSTALONGA, M. L. "Redução de arraste por adição de polímeros em escoamentos turbulentos em espaços anulares". 2017. 62p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Espírito Santo, 2017.

DEN TOONDER, J. M. J. et al. "Degradation Effects of Dilute Polymers Solutions on Turbulent Drag Reduction in Pipe Flows", *Applied Scientific Research*, vol. 55, pp. 63-82, 1995.

DUBIEF, Y. et al. "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 514, pp. 271-280, 2004.

ELBING, B. R. et al. "Degradation of homogeneous polymer solutions in high shear turbulent pipe flow", *Exp Fluids*, vol. 47, pp. 1033–1044, 2009.

FABULA, G. "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction", *Trans ASME Journal of Basic Engineering*, vol. 93, pp. 453-455, 1971.

FIGUEREDO, R. C. R.; SABADINI, E. "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide", *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, pp. 77-86, 2003.

FORREST, F.; GRIERSON, G. A. "Friction losses in cast iron pipe carrying paper stock", *Paper Trade Journal*, vol. 92, no. 22, pp. 39-41, 1931.

FUJIMOTO H.; TAGORI T. "Friction reduction of pipe-flow of iron ore slurry by polymer solution injection", Paper 32, Proc. 1st Japanese Towing Tank Conf., 1974.

GASLJEVIC, K.; AGUILAR, G.; MATTHYS, E.F. "On two distinct types of drag-reducing fluids, diameter scaling, an turbulent profiles", *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanical*, vol. 96, pp. 405-425, 2001.

GOLDA, J. "Hydraulic transport of coal in pipes with drag reducing additives", *Chemical Engineering Communications - Chem Eng Commun*, vol. 43, pp. 53-67, 1986.

HERSHEY, H. C.; ZAKIN, J. L. "A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions", *Chemical Engineering Science*, vol. 22, pp. 184-187, 1967.

INTERTHAL, W. et al. "Drag reduction in hydraulic sand transport-Field test results", *Proceedings of the Eighth International Technical Conference on Slurry Transportation*, pp. 125-130, 1983.

JOSEPH, D. D. "Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids", New York: Springer Verlag, vol. 84, 1990.

KALASHNIKOV, V. N. "Dynamical similarity and dimensionless relations for turbulent drag reduction by polymer additives", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 75, pp. 209–230, 1998.

KAMEL, A.; SHAH, S. N. "Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 67, pp. 23–33, 2009.

KAMENEVA, M. V. et al. "Blood soluble drag-reducing polymers prevent lethality from hemorrhagic shock in acute animal experiments", *Biorheology*, vol. 41, pp. 53-64, 2004.

KATO, H.; GOTO, S.; YOKOYA, S. "The Toms effect of a dilute polymer solution and its application", *Bulletin of the JSME*, vol. 15, pp. 492 – 501, 1972.

KENIS, P. R. "Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 15, pp. 607-618, 1971.

KIM, S.C.; KIM, C.B. "A drag reduction in cwm transportation with polymer additives", *KSME Journal*, vol. 5, pp. 53-58, 1991.

KOLĀŘ, V. et al. "Experiments with a drag reducing polymer in an ash-slag hydrotransport pipeline", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 26, pp. 143-158, 1988.

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.

L'VOV, V. S. et al. "Drag reduction by polymers in wall bounded turbulence", *Physical Review Letters*, vol. 92, pp. 244503-1-244503-4, 2004.

LIMA, G. J. A. "Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto". Dissertação de mestrado em engenharia ambiental, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, 154p, 2007.

LOUREIRO, B. V.; SILVA, L. A. S.; KLIPPEL, M.S. "Efeito da redução de arraste por adição de polímeros comerciais: efeito da concentração e diâmetro de tubo". In: IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás – ENAHPE, 2011, Foz do Iguaçu.

LUMLEY, J. L. "Drag reduction by additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 11, pp. 367-384, 1969.

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

MERRILL, E. W.; HORN, A. F. "Scission of macromolecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows", *Polymer Communications*, vol. 25, pp. 144-146, 1984.

MIN, T. et al. "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 486, pp. 213-238, 2004.

MORRIS, E. R. "Molecular Origin of Xanthan Solution Properties", *Extracellular Microbial Polysaccharides, ACS Symposium Series, Chapter 6*, vol. 45, pp. 81-89, 1977.

MOSTARDI, R. A. et al. "Suppression of atherosclerosis in rabbits using drag reducing polymers", *Biorheology*, vol. 15, pp. 1-14, 1978.

MOUSSA, T.; TIU, C. "Factors affecting polymer degradation in turbulent pipe flow", *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681-1692, 1994.

MULLER, G. et al. "Salt dependence of the conformation of a single-stranded xanthan", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 8, pp. 167-172, 1986.

MYSELS, K. J. "Flow of thickened fluid", *US Patent 2 492, 173*, December 27, 1949.

NAKKEN, T.; TANDE, M.; ELGSAETER, A. "Measurements of polymer induced drag reduction and polymer scission in Taylor flow using standard double-gap sample holders with axial symmetry", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 97, pp. 1-12, 2001.

PATERSON, R. W.; ABERNATHY, F. H. "Turbulent flow drag reduction and degradation with dilute polymer solutions", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 43, pp. 689-710, 1970.

PEREIRA, A. S. et al. "Transient aspects of drag reducing plane Couette flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 241, pp. 60-69, 2017.

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

PEREIRA, A. S.; ANDRADE, R. M.; 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.

POREH, M. et al. "Drag reduction in hydraulic transport of solids", *J. of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, HY4, pp.903 – 909, 1970.

POVKH, I. L.; STUPIN, A. B. "Effect of polyacrylamide additive on the reduction of hydraulic losses in water streams with suspended solid particles", *Journal of Engineering Physics*, vol. 22, pp. 644-645, 1972.

PTASINSKI, P. K. et al. "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction", *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 66, pp. 159-182, 2001.

ROCHEFORT, W. E.; MIDDLEMAN, S. "Relationship between rheological behavior and drag reduction for dilute xanthan gum solutions", in *Drag Reduction Fluid Flows*, R. H. Sellin and R. T. Moses, Eds., p. 69, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1989.

SANDOVAL, G. A.; 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.

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.

SELLIN, R. H. J. "Drag reducing polymer use in hydrotransport", *Ice Proceedings*, vol. 86, pp. 381-394, 1989.

SILVA, R. T. "Redução de arrasto em geometrias rotativas e em leitos arteriais". 2017. 73p. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Espírito Santo, 2017.

SINGH, H. K. G.; JAAFAR, A.; 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.

SINGH, R. P. et al. "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.

SOARES, E. J. et al. "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.

SOHN, J. I. et al. "Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus", Carbohydrate Polymers, vol. 45, pp. 61-68, 2001.

SREENIVASAN K. R.; WHITE C. M. "Analysis of polymer drag reduction on a flat plate", Journal of Fluid Mechanics, vol. 409, pp. 149-164, 2000.

TABOR, M.; DE GENNES, P. G. "A cascade theory of drag reduction", Europhysics Letter, vol. 7, pp. 519-522, 1986.

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

UNTHANK, J. L. S. G. et al. "Improvement of flow through arterial stenoses by drag reducing agents", Journal of Surgical Research, vol. 53, pp. 625-630, 1992.

VANAPALLI, S. A.; ISLAM, T. M.; SOLOMON, J. M. "Universal scaling for polymer chain scission in turbulence", Physics of Fluids, vol. 17, pp. 1-11, 2005.

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

VIRK, P. S.; WAGGER, D. L. "Aspects of mechanism in type B drag reduction", in Proceedings of the 2nd IUTAM Symposium on Structure of Turbulence and Drag Reduction, Zurich, Switzerland, 1989.

VIRK, P. S. et al. "The toms phenomenom: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions", Journal of Fluid Mechanics, vol. 22, pp. 22-30, 1967.

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

VIRK, P.S.; SHERMAN, D.C.; WAGGER, D. L. "Additive equivalence during turbulent drag reduction", AIChE Journal, vol. 43, pp. 3257-3259, 1997.

WARHOLIC, M. D.; MASSAH, H.; 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.

WHITE, C. M.; MUNGAL, M. G. "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction whit polymer additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 40, pp. 235-256, 2008.

WYATT, N. B.; GUNTHER, C. M.; 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.

ZAKIN, J. L.; HUNSTON, D. L. "Effects of solvent nature on the mechanical degradation of high polymer solutions", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 22, pp. 1763-1766, 1978.