

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

KELVIN CRISTIEN DE OLIVEIRA BARBOSA

**ESTUDO DA MUCILAGEM E FIBRA NATURAL DA BABOSA (*ALOE VERA*)
COMO REDUTORES DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS.**

VITÓRIA
2017

KELVIN CRISTIEN DE OLIVEIRA BARBOSA

**ESTUDO DA MUCILAGEM E FIBRA NATURAL DA BABOSA (*ALOE VERA*)
COMO REDUTORES DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS.**

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

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

Coorientador: Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira

VITÓRIA

2017

KELVIN CRISTIEN DE OLIVEIRA BARBOSA

**ESTUDO DA MUCILAGEM E FIBRA NATURAL DA BABOSA (*ALOE VERA*)
COMO REDUTORES DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS.**

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 10 de março de 2017.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. André Luiz de Castro Machado – Examinador Externo
Petrobras

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto - Examinador Externo
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rafael Sartim - Examinador Externo
Universidade Federal do Espírito Santo/Arcelor

“ A persistência é o melhor caminho do êxito. ”

Charles Chaplin

À Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pela vida, saúde, força e sabedoria para seguir em frente e alcançar mais um objetivo.

Agradeço a minha família pelo incentivo e todo o suporte proporcionado, em especial a minha mãe Aniceia de Oliveira Barbosa e ao meu pai Demilson Soares Barbosa que sempre torceram por minhas conquistas e estiveram ao meu lado.

Agradeço ao professor Edson José Soares por sua orientação, sabedoria e disposição para a realização deste trabalho, além de agradecer pelo incentivo, confiança e colaboração com o meu desenvolvimento.

Agradeço ao professor Renato do Nascimento Siqueira por sua orientação, respeito, além de agradecer pela disponibilidade em ajudar e compartilhar seus 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 Jéssica Vargas pela ajuda, companheirismo, atenção e paciência.

Agradeço também aos amigos do mestrado, Eduardo Coelho, Renata Trevelin, Alan Modolo, Gabriel Vargas, Michel Costalonga e aos demais. Agradeço em especial ao Leandro Motta e Frederico Santana pelo total apoio, esforço e dedicação para a realização desta pesquisa. Desejo sucesso a todos.

Agradeço ao amigo Lucas Antônio e colaboradores do Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte da Faculdade Cetro Leste (UCL), pelo suporte e contribuição durante a realização deste trabalho.

Agradeço também, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo e financiamento de recursos para a realização da pesquisa, e ao pessoal da secretária e demais professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela disponibilidade, atenção e conhecimento.

RESUMO

A redução de arrasto por adição de pequenas quantidades de aditivos em escoamento turbulento vem sendo estudada desde a década de 40, depois de ser reportado por Toms (1948). Devido à importância e a ampla aplicabilidade, muitos pesquisadores têm direcionado suas pesquisas para estudar esse fenômeno. Porém, a maioria dos estudos de redução de arrasto são realizados com polímeros sintéticos, que são poucos resistentes a altas taxas de cisalhamento e apresentam toxicidade, fatores que limitam a utilização desses materiais em certas aplicações, como em meio ambiente e seres humanos. Dessa forma, a busca por materiais naturais redutores de arrasto vem crescendo, pois esses materiais em sua maioria são mais resistentes, biodegradáveis e atóxicos, o que os tornam uma boa alternativa para substituir os sintéticos em algumas aplicações. Este trabalho propõe dois novos agentes naturais redutores de arrasto, a mucilagem e o pó da casca de aloe vera. Os testes são realizados em um aparato experimental composto de tubulações em série, onde a seção principal de teste é feita de aço inoxidável com tratamento de brunimento, além de um medidor de vazão magnético e três transdutores para obtenção de dados durante os experimentos. Como os materiais testados não estão disponíveis comercialmente para aquisição, foi necessário desenvolver metodologias para obtenção dos mesmos. Diversas análises são realizadas à medida que a concentração de mucilagem é variada, como: o comportamento da redução de arrasto, vazão, queda de pressão e perda de eficiência (redução de arrasto relativa - DR'). Como a mucilagem é um material natural, foi feita uma análise sobre a degradação biológica na capacidade de redução de arrasto. Além disso, alguns testes foram feitos com a casca de aloe vera e os resultados de redução de arrasto foram comparados com a mucilagem e com outros materiais redutores, como os naturais rígidos, Goma Xantana (XG) e uma mistura de polímero e fibra de quiabo, e o sintético flexível, Óxido de Polietileno (PEO). Finalmente, esses materiais naturais foram misturados entre si e também com o polímero flexível PEO para analisar a existência de efeitos sinérgicos entre eles. Os resultados obtidos a partir dos novos materiais naturais redutores de arrasto foram satisfatórios e promissores.

ABSTRACT

The drag reduction by addition of small amounts of additives into a turbulent flow has been studied since the 1940s, when it was reported by Toms (1948). Due to the importance and wide applicability, many researchers directed their studies to this phenomenon in the last decades. However, most of the drag reduction studies are carried out with synthetic polymers, which are less resistant to high shear rates and toxic, factors that limit their use in some applications, such as environment and human beings. Therefore, the search for natural drag reduction materials is growing, because these materials are more resistant, more biodegradable and non-toxic, making them a good alternative to replace the synthetic ones in some applications. This work proposes two new natural drag reduction agents, the mucilage and powder of the aloe vera peel, which were investigated to verify their capacity to reduce drag. The tests were carried out in an experimental apparatus composed of pipes in series, where the main section of the test is made of stainless steel with burnishing treatment, in addition to a magnetic flowmeter and three pressure transducers to obtain the data during the experiments. Since the materials tested are not commercially available, it was necessary to develop methodologies to their production. Several analyses were carried out as the mucilage concentration is varied, like drag reduction behavior, flow rate, pressure drop and efficiency loss (relative drag reduction - DR'). Since mucilage is a natural material, it was made an analysis about the biological degradation in the drag reduction capacity. In addition, some tests were carried out with the aloe vera peel and the drag reduction results of peel and mucilage were compared with others drag reduction materials already studied, such as the rigid natural Xantana Gum (XG) and a mixture of okra polymer and fiber, and the flexible synthetic Polyethylene Oxide (PEO). Finally, these materials are mixed with each other and also with the flexible polymer PEO to analyze the existence of synergistic effects between them. From this study, the results obtained by the new natural drag reduction materials were promising and satisfactory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede. Dubief <i>et al.</i> (2004)	21
Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008).	22
Figura 1.3 – Processo de esticamento e cisão macromolecular. Soares <i>et al.</i> (2015)	23
Figura 1.4 – Polimerização do óxido de etileno.....	24
Figura 1.5 – Processo de desagregação molecular. Soares <i>et al.</i> (2015).....	26
Figura 1.6 - Estrutura do principal componente do gel de aloe vera. Chow <i>et al.</i> (2005)	30
Figura 2.1 – Desenho esquemático da bancada experimental. Coelho <i>et al.</i> (2016).	34
Figura 2.2 – Reômetro Haake Mars II.	35
Figura 2.3 - Etapas de processamento da mucilagem.	37
Figura 2.4 - Etapas de processamento da casca da folha de aloe vera.....	39
Figura 2.5 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução. Pereira, Andrade e Soares (2013).	43
Figura 3.1 – Teste de validação da bancada experimental.	47
Figura 3.2 – Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões: concentrações diferentes.....	49
Figura 3.3 - Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões: resultados próximos com concentrações diferentes.....	50

Figura 3.4 - Teste de armazenagem: análise na bancada experimental.	51
Figura 3.5 - Teste de armazenagem: análise no reômetro.	52
Figura 3.6 - Análise da mudança de método para a extração da mucilagem.	54
Figura 3.7 - Efeito da concentração na redução de arrasto em função do número de passes.	55
Figura 3.8 - Efeito da concentração na redução de arrasto máxima e assintótica. ...	57
Figura 3.9 - Vazão em função do número de passes para diferentes concentrações	58
Figura 3.10 - Queda de pressão em função do número de passes para diferentes concentrações.	59
Figura 3.11 - Análise de desagregação dos polímeros nas soluções de aloe vera. ...	61
Figura 3.12 – Efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto.	62
Figura 3.13 - Comparação entre mucilagem e pó da casca de aloe vera em relação à capacidade de redução de arrasto.	64
Figura 3.14 - Comparação entre mucilagem e pó de quiabo em relação à capacidade de redução de arrasto.	65
Figura 3.15 - Comparação entre mucilagem, pó de quiabo e Goma Xantana em relação à capacidade de redução de arrasto.	67
Figura 3.16 - Comparação entre mucilagem e Óxido de Polietileno (PEO) em relação à capacidade de redução de arrasto.	68
Figura 3.17 - Mistura de mucilagem e pó da casca da folha de aloe vera.	70
Figura 3.18 - Mistura do pó da casca da folha de aloe vera e PEO.	71
Figura 3.19 - Mistura da mucilagem de aloe vera e PEO.	72

LISTA DE SÍMBOLOS

PAM	Poliacrilamida
PEO	Óxido de Polietileno
XG	Goma Xantana
MDR	máxima redução de arrasto
DRA	agente redutor de arrasto
CMC	Carboximetilcelulose
c	concentração polimérica (ppm)
D_R	razão de arrasto – $D_R = \Delta p / \Delta p_0$
DR	coeficiente de redução de arrasto – $DR = 1 - f/f_0$
$\%DR$	coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
$DR(t)$	valor da redução de arrasto para cada passe (%)
$DR_{máx}$	valor máximo do coeficiente de redução de arrasto (%)
DR_{assint}	valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto (%)
DR'	coeficiente da redução de arrasto relativa – $DR' = DR(t)/DR_{máx}$
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)
M_v	massa molecular média (g/mol)
N_p	número de passes da solução pela bancada experimental (un.)
Q	vazão do escoamento (m ³ /h)
$Q_{m\acute{a}x}$	vazão máxima (m ³ /h)
Q_{assint}	vazão assintótica (m ³ /h)
Re	número de Reynolds – $Re = \rho \bar{u} d / \eta$
t_r	tempo de resistência (s)
η	viscosidade dinâmica da solução (Pa.s)
ρ	massa específica (kg/m ³)
σ	desvio padrão
$d_{m\acute{a}x}$	desvio máximo aceitável
N	número de valores da amostra (un.)
ω	velocidade angular do rotor (rad/s)
ΔP	queda de pressão da solução (Pa)
ΔP_o	queda de pressão do solvente (Pa)
$\Delta P_{inicial}$	queda de pressão inicial (Pa) – no primeiro passe
ΔP_{assint}	queda de pressão assintótica (Pa)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Massas obtidas por pesagem e respectivas concentrações.	38
Tabela 2.2 - Critério de Chauvenet.	44

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
SUMÁRIO	XIV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação	16
1.2 Estado da Arte	18
1.3 Caracterização do problema	31
CAPÍTULO 2 – ABORDAGEM EXPERIMENTAL	33
2.1 Equipamentos	33
2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto	33
2.1.2 Reômetro	35
2.1.3 Balanças	35
2.2 Produção do material de teste	36
2.2.1 Extração da mucilagem da planta aloe vera	36
2.2.2 Produção do pó da casca da folha de aloe vera	38
2.3 Descrição dos testes no aparato experimental	39
2.3.1 Testes para análise do efeito da variação de concentração	42
2.3.2 Testes de degradação biológica	42
2.3.3 Medição da viscosidade.....	42

2.4 Critério estatístico para rejeição dos dados.....	43
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS	46
3.1 Resultados preliminares	46
3.1.1 Validação da bancada	46
3.1.2 Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões.....	48
3.1.3 Análise de armazenagem da mucilagem e repetitividade dos testes 50	
3.2 Influências da concentração na redução de arrasto absoluta.....	54
3.2.1 Comportamento da vazão e da queda de pressão através da seção de teste	57
3.3 Redução de arrasto relativa	60
3.4 Efeitos da degradação biológica	62
3.5 Comparação entre diferentes agentes redutores de arrasto.	63
3.6 Redução de arrasto com mistura de materiais	69
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O fenômeno de redução de arrasto a partir da adição de pequena quantidade de aditivos vem sendo estudada desde a década de 40 e está relacionado à redução da perda de energia em escoamentos turbulentos. A redução de arrasto ocorre quando pequenas quantidades de materiais redutores de arrasto são adicionadas em um solvente líquido, conforme observado por Forrest e Grierson (1931), o primeiro a verificar o fenômeno, porém, naquela época, não teve o devido reconhecimento e importância. Em seguida Toms (1948) e Mysels (1949) também observaram esse fenômeno, sendo o trabalho de Toms difundido a época. Em termos de aplicação prática, essa técnica despertou interesse de diversos pesquisadores de diferentes áreas, como em escoamentos de líquidos no setor industrial e até mesmo aplicações medicinais.

Devido aos benefícios obtidos, a técnica de redução de arrasto vem sendo amplamente estudada e existem diversos materiais que podem ser utilizados como aditivos redutores de arrasto, dentre eles se destacam os polímeros, surfactantes,

polpa de papel, mucilagens¹, fibras, bolhas de ar, etc. Neste trabalho usa-se mucilagem extraída da planta aloe vera.

A principal aplicação prática da técnica de redução 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. Segundo Burger e Chorn (1980), soluções com pequena quantidade de aditivos, mais especificamente, poliolefinas (solúveis em óleo) são injetadas a jusante das 12 diferentes estações de bombeamento com o objetivo de aumentar a vazão a uma queda de pressão constante, obtendo-se assim, um ganho na produção de aproximadamente 30%. Além da “*Trans Alaska Pipe Line*”, existem outras aplicações da redução de arrasto em escoamento de óleo bruto através de oleodutos, como: Estreito de Bass na Austrália, Iraque-Turquia, extração de petróleo no mar em Mumbai (Nijs, 1985) e no mar do norte (Dujmovich e Gallegos, 2005).

Além das aplicações no escoamento de óleo, 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) investigam o efeito da redução de arrasto em sistemas de combate a incêndio, em que o principal objetivo é utilizar a menor quantidade de energia para bombear a água e aumentar o alcance dos jatos de água. Larson (2003) utilizou aditivos no casco de navios e verificou um aumento na velocidade da embarcação devido a diminuição do atrito do casco do navio com a água. Singh *et al.* (1985) destacam a utilização em hidrelétricas e em sistemas de irrigação para aumentar a vazão de água além de economizar energia no caso de irrigação. Na medicina, a redução de arrasto também é estudada e os resultados são satisfatórios, como reportado por Mostardi *et al.* (1978), Unthank *et al.* (1992) e Chen *et al.* (2011) para o combate ao derrame cardíaco causado por aterosclerose e por Kameneva *et al.* (2004), na prevenção da letalidade do choque hemorrágico.

¹ É uma substância viscosa produzida por quase todas as plantas e alguns microrganismos (ABDULBARI, SHABIRIN e ABDURRAHMAN, 2014). Além de ser uma glicoproteína com estrutura complexa.

A maioria dos estudos de redução de arrasto utilizam polímeros sintéticos, porém esse tipo de polímero apresenta característica tóxica e não podem ser utilizados com segurança em todas as aplicações, como por exemplo em aplicações médicas ou as que envolvem meio ambiente. Dessa forma, muitos pesquisadores têm direcionado suas pesquisas para investigar novos materiais naturais que apresentam capacidade em reduzir arrasto. Esses materiais naturais são mais biodegradáveis e mais resistentes quando comparados aos sintéticos além de proporcionarem ótimos ganhos de redução de arrasto e poderem substituir os sintéticos em algumas aplicações.

Muitos materiais naturais apresentam capacidade de reduzir arrasto, como por exemplo: as mucilagens de aloe vera e quiabo, casca de banana processada e nata de coco em suspensão. Porém, a utilização desses materiais como agente redutor de arrasto (DRA – *Drag Reduction Agent*) é baixa nos dias atuais. Por mais que apresentem boa capacidade em reduzir arrasto, esses materiais precisam ser mais estudados para que suas características, composições e outras informações sejam bem conhecidas.

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar através de um método experimental o fenômeno de redução de arrasto para soluções aquosas com mucilagem e fibras de aloe vera, que são materiais rígidos. Dessa forma, foi necessário desenvolver metodologias para produzir os materiais utilizados. Na sequência, estuda-se a capacidade de redução de arrasto desses materiais e os efeitos da concentração (c), degradação biológica e mistura com polímero flexível (Óxido de Polietileno – PEO) para verificar efeitos sinérgicos.

1.2 Estado da Arte

A primeira observação do fenômeno de redução de arrasto em escoamentos turbulentos é atribuída a Forrest e Grierson (1931), quando os autores colocaram fibras de polpa de madeira em escoamento de água e verificaram uma diminuição do consumo de energia para escoar essa solução, porém, naquela época, esse fenômeno não teve a devida divulgação. Após mais de 15 anos, Toms (1948) observou que a partir da diluição de soluções poliméricas em baixa concentração e

alto peso molecular alcançava-se uma drástica redução do fator de atrito no escoamento. O autor menciona que esse fenômeno está associado ao escoamento turbulento e é intensificado com o aumento do número de Reynolds (Re) e que a injeção de aditivos resulta em um aumento significativo da vazão, desde que a queda de pressão seja mantida constante. Como Toms foi o primeiro a reportar esse fenômeno, o mesmo passou a ser conhecido como “*Toms effect*”. Já o termo “redução de arrasto” foi introduzido por Savins (1964), quando ele definiu D_R como uma razão da queda de pressão da solução pela queda de pressão do solvente, medidos na mesma vazão e na mesma tubulação, resultando assim a Equação 1.

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

Sendo que ΔP e ΔP_0 representam a queda de pressão durante o escoamento da solução e do solvente, respectivamente. Assim, a partir da definição do autor, pode-se dizer que uma solução polimérica é redutora de arrasto se sua relação de arrasto (D_R) for inferior a 1. Logo, a redução de arrasto em termos percentuais é definida pela Equação 2.

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

Lumley (1969) propôs uma definição de redução de arrasto em função do fator de atrito da solução e do solvente, onde se considera redução de arrasto quando o fator de atrito obtido pela solução polimérica é inferior ao fator de atrito do solvente utilizado, comparados no mesmo número de Reynolds. Essa definição é largamente utilizada e é expressa pela Equação 3.

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

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

Existem teorias relacionadas aos mecanismos que envolvem o fenômeno de redução de arrasto, porém, elas não são completamente aceitas e dividem opiniões entre pesquisadores. Sendo assim, as teorias mais utilizadas em análises de redução de arrasto são divididas em duas classes, uma que é baseada em efeitos viscosos, proposta por Lumley (1973), e outra proposta por Tabor e De Gennes (1986), que é baseada em efeitos elásticos. Primeiramente, Lumley (1973) defende que o aumento da viscosidade extensional do fluido durante o escoamento ocorre devido ao estiramento das moléculas do polímero em certas escalas de turbulência. O autor ainda argumenta que o aumento dessa viscosidade fora da subcamada viscosa, suprime as flutuações turbulentas (responsáveis pela dissipação de energia), incrementando a espessura da camada de transição em direção ao centro do tubo e ocasionando a diminuição do atrito. Já Tabor e De Gennes (1986) propõem a teoria elástica. Os autores consideram que o efeito do polímero é sentido apenas nas pequenas escalas de turbulência, onde a energia elástica acumulada pelos polímeros parcialmente esticados se equipara com a energia cinética turbulenta na camada de transição, resultando assim na redução do atrito. Com isso a cascata de Kolmogorov é interrompida prematuramente pelas macromoléculas, impedindo assim que os vórtices se dividam em outros menores e, dessa forma, diminui a dissipação da energia do escoamento, que ocorreria nas menores escalas de turbulência (escala de Kolmogorov).

Dubief *et al.* (2004) propõem outra teoria interessante sobre o fenômeno de redução de arrasto. Com o auxílio de simulação numérica realizadas em um canal, os autores descrevem a interação das macromoléculas dos polímeros flexíveis e o escoamento turbulento. Eles abordam que as macromoléculas trabalham de forma cíclica e organizada, assim, armazenam energia dos vórtices e cede essa energia para o escoamento, esse comportamento pode ser observado na Figura 1.1, onde o parâmetro E (“trabalho do polímero”) representa a relação entre o polímero e os vórtices turbulentos durante o escoamento. Os subscritos x e α indicam a direção principal do escoamento e qualquer outra direção, respectivamente. A ordenada (y^+) e abscissa (z^+) são distâncias adimensionais normal à parede. Os polímeros se

encolhem (na região $y^+ = 5$) devido à redução de energia cinética turbulenta, acumulando energia elástica na subcamada de transição. Na sequência as macromoléculas são esticadas a partir de interações com os vórtices e escoamento médio dessa região ($E_\alpha < 0$). A macromolécula, contendo energia armazenada, é compelida à região de subcamada viscosa, onde volta a se encolher e cede essa energia para o escoamento na direção principal ($E_x > 0$). Esse ciclo se repete inúmeras vezes durante o escoamento.

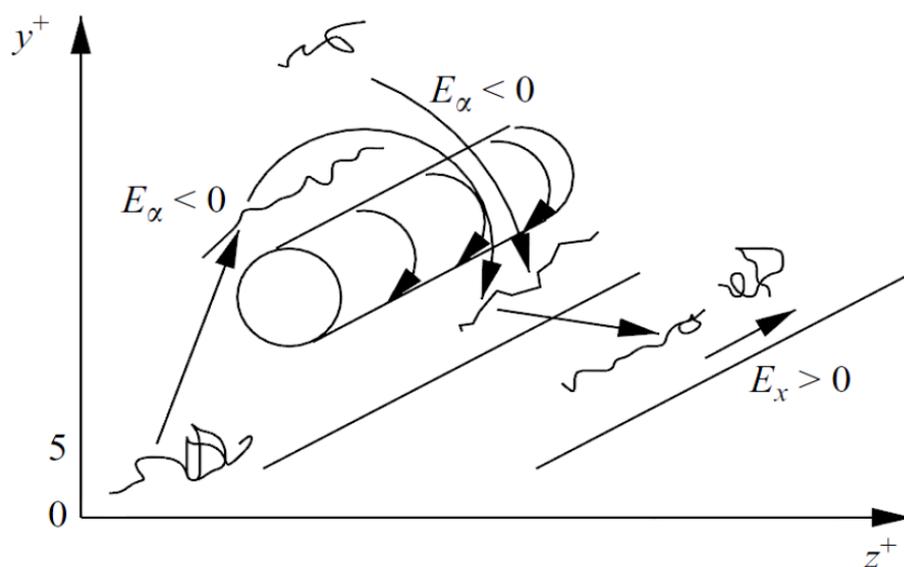


Figura 1.1 – Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede. Dubief *et al.* (2004)

Um fato extremamente importante diz respeito ao limite máximo de redução de arrasto, reportado por Virk *et al.* (1967). Os autores realizaram um estudo experimental de redução de arrasto utilizando uma série de soluções poliméricas diluídas em escoamentos turbulentos em dutos. Através desses experimentos, eles observaram que, fixando-se o número de Reynolds e aumentando a concentração, os níveis de redução de arrasto se elevavam até atingir um valor máximo possível, alcançando assim uma concentração crítica e, a partir desse momento, o incremento dessa concentração não apresentava aumento em redução de arrasto, pois a solução estava saturada. Esse nível máximo é conhecido como a máxima redução de arrasto (MDR) ou Lei de Virk, em homenagem ao autor. Ainda de acordo com os autores, 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. Esses comportamentos podem ser observados na Figura 1.2. O mesmo se observa com o aumento da massa molecular (M_v).

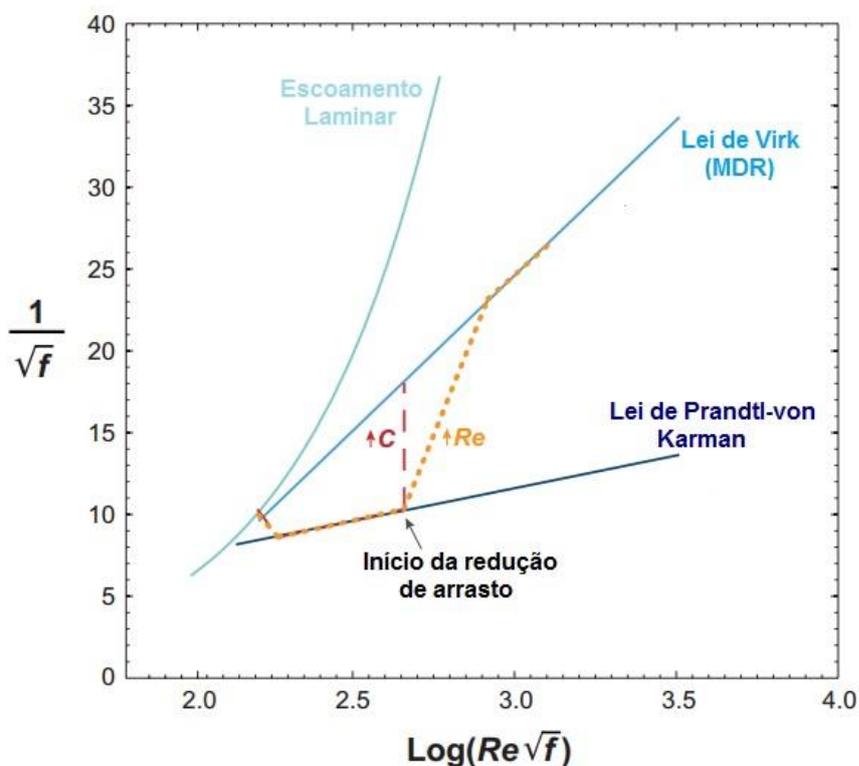


Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008).

De acordo com White e Mungal (2008), a MDR tem duas interpretações possíveis. A primeira é baseada na teoria viscosa, utilizada por Virk (1975) e Sreenivasan e White (2000), que diz que a MDR ocorre quando o efeito do polímero é sentido em todas as escalas do escoamento, dessa forma, faz com que a camada de transição se estenda por toda a camada limite. A outra interpretação está associada a teoria elástica, utilizada por Warholic, Massah e Hanratty (1999), Ptasinski *et al.* (2001) e Min *et al.* (2004). Nesse caso, a MDR ocorre quando os tensores de Reynolds são completamente reduzidos e os mecanismos que sustentam a turbulência são agora conduzidos, principalmente, pelas flutuações das tensões dos polímeros. O início da redução de arrasto (apresentado na Figura 1.2) ocorre apenas para um certo nível de turbulência e é outro aspecto que divide opiniões de muitos pesquisadores no que diz respeito a teoria viscosa e elástica. A partir da teoria viscosa, defendida por Lumley (1969), Ryskin (1987) e L'vov *et al.* (2004), o início da redução de arrasto ocorre quando os vórtices da subcamada de transição são capazes de esticar as moléculas dos polímeros, suprimindo as flutuações turbulentas e aumentando a espessura da

subcamada de transição. 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 se equivale à energia cinética turbulenta de algumas escalas na região da subcamada de transição, dessa forma, a cascata de Kolmogorov é prematuramente interrompida.

Um aspecto importante da redução de arrasto é a degradação polimérica, que é um grande problema da redução de arrasto por polímeros. De acordo com White e Mungal (2008), a degradação polimérica ocorre quando as macromoléculas se rompem devido as tensões do escoamento turbulento, dessa forma, essas moléculas se dividem em outras menores, causando assim perda de eficiência do polímero. Merrill e Horn (1984) utilizaram técnicas de cromatografia de permeação em gel e verificaram que as cisões das macromoléculas ocorrem próximo ao seu ponto médio. Os autores acreditam que a degradação ocorre quando as macromoléculas se encontram esticadas e alinhadas com o escoamento. Esse fato também é relatado por Odell, Keller e Miles (1983). Apresenta-se na Figura 1.3 um esquema da degradação polimérica, onde inicialmente o polímero encontra-se encolhido (em repouso) e após a aplicação de uma tensão de deformação (escoamento) o mesmo é esticado e ocorre a cisão mecânica no ponto médio da molécula.

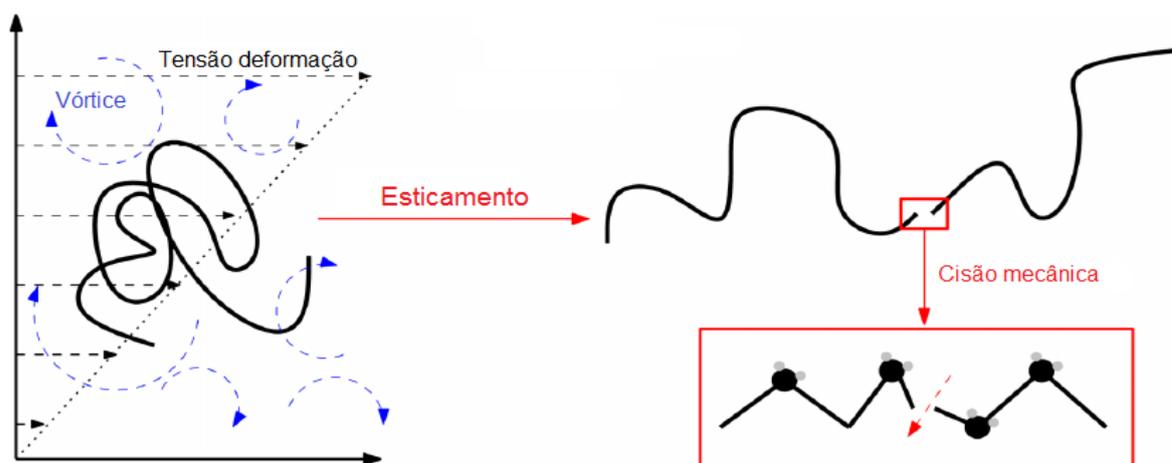


Figura 1.3 – Processo de esticamento e cisão macromolecular. Soares *et al.* (2015)

Através de estudos sobre a degradação em soluções de PEO em escoamento turbulento em dutos, Paterson e Abernathy (1970) verificaram que em Reynolds mais elevados a degradação das moléculas eram mais intensas e que as soluções se

tornavam mais resistentes com o aumento da massa molecular ou da concentração. Tais comportamentos também são observados por Moussa e Tiu (1994) quando os autores realizaram experimentos similares com diferentes polímeros.

Vanapalli, Islam e Solomon (2005), em seus estudos experimentais sobre a degradação de soluções de Óxido de Polietileno (PEO) e Poliacrilamida (PAM) em escoamento turbulento em dutos, observaram que quando o número de Reynolds era fixado, a massa molecular média ia diminuindo (análise feita através de cromatografia em gel) e a partir de um certo tempo de experimento a redução de arrasto tendia a um regime permanente (valor assintótico), ponto no qual nenhuma degradação adicional era observada. Esse comportamento também foi apresentado por Choi *et al.* (2000), Nakken, Tande e Elgsaeter (2001) e Pereira e Soares (2012) em seus estudos sobre degradação polimérica.

Como pôde ser observado, muitas teorias e aspectos da redução de arrasto estão relacionadas a materiais flexíveis, como o Óxido de Polietileno (PEO), que é um polímero sintético de cadeia linear, solúvel em água e obtido da polimerização do óxido de etileno (éter cíclico - C_2H_4O). A Figura 1.4 ilustra sua unidade estrutural do PEO, onde N indica o número de unidades estruturais ou grau de polimerização. No entanto, materiais rígidos também são capazes de reduzir arrasto em escoamentos turbulento, fato reportado por diversos pesquisadores como, Kenis (1971), Bewersdorff e Singh (1988), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares *et al.* (2015) em seus estudos com esse tipo de material (Goma Xantana, Goma Guar e outros). Assim como ocorre para materiais flexíveis, os autores verificaram que com o aumento da concentração e massa molecular do material rígido era observado um incremento da redução de arrasto. Porém, o comportamento de matérias rígidos no fenômeno de redução de arrasto ainda não foi suficientemente estudado.

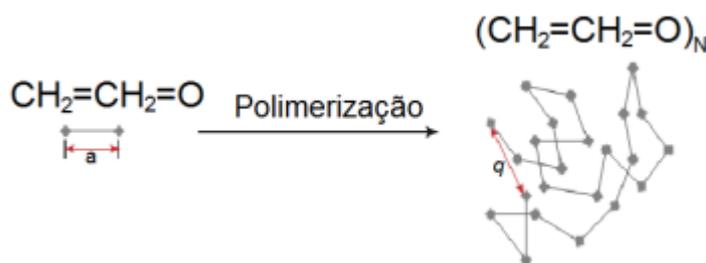


Figura 1.4 – Polimerização do óxido de etileno

Para os diferentes materiais (rígido e flexível), Virk, Sherman e Wagger (1997) propõem dois mecanismos de redução de arrasto, Tipo A e Tipo B. O mecanismo Tipo A está associado aos materiais que se encontram enovelados (encolhidos) em repouso, os quais necessitam de um nível de turbulência para que suas macromoléculas sejam esticadas e ocorra uma redução do fator de atrito. Esse tipo de comportamento é característico de materiais flexíveis, dentre eles, destacam-se os polímeros PEO e PAM. Já o mecanismo Tipo B está associado aos materiais que se encontram estendidos (alongados) em repouso, uma vez que as macromoléculas se encontram estendidas, a redução do fator de atrito ocorre após a mudança entre os regimes laminar e turbulento. Tal comportamento é característico de materiais rígidos, como a Goma Xantana (XG) e diversos outros materiais rígidos como a fibra e mucilagem. Gasljevic, Aguilar e Matthys (2001) analisaram esses dois mecanismos apresentados e verificaram que as macromoléculas de materiais Tipo B se encontravam esticadas após o início da redução de arrasto, e que o aumento da turbulência não influenciava na configuração molar do material. Os autores verificaram também que os materiais do Tipo A passavam a apresentar um comportamento do Tipo B a partir do momento que suas macromoléculas estavam totalmente estiradas.

Os materiais rígidos utilizados para reduzir arrasto são encontrados na natureza e apresentam uma vantagem em relação aos flexíveis, que é sua alta resistência a degradação mecânica, porém, por serem naturais possuem uma desvantagem que é a degradação biológica. Alguns estudos são feitos para comparar materiais rígidos e flexíveis. Kenis (1971) fez comparações entre diversos materiais, como: Goma Xantana e Goma Guar (rígidos) com PEO e PAM (flexíveis). O autor verificou que os materiais rígidos apresentaram maior estabilidade das cadeias poliméricas, ou seja, maior resistência a degradação mecânica, comportamento também reportado por Sohn *et al.* (2001).

Mais recentemente, Soares *et al.* (2015) analisaram a resistência da Goma Xantana e PEO e PAM em escoamento turbulento em dutos com e sem a presença de uma bomba centrífuga no aparato experimental. Na configuração sem bomba, a solução é deslocada por ar comprimido. Os resultados de Goma Xantana para ambas as configurações não apresentam variações consideráveis em termos de redução de arrasto. Logo, as altas taxas de cisalhamento na bomba centrífuga não geram degradação mecânica adicional à solução, quando comparado ao escoamento sem

bomba no mesmo número de Reynolds. Ainda de acordo com os autores, ao contrário do que ocorre com o material rígido (XG), os materiais flexíveis (PEO e PAM) apresentaram resultados completamente distintos quando submetidos as diferentes configurações do aparato experimental. Observa-se uma queda drástica da redução de arrasto com a utilização da bomba, quando comparado ao escoamento sem bomba no mesmo número de Reynolds.

Para Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares *et al.* (2015) a degradação polimérica é uma característica dos polímeros flexíveis. Os autores ainda supõem que as moléculas dos polímeros rígidos, XG por exemplo, se conectam através de forças intermoleculares e formam agregados (cadeias moleculares). Com isso, quando a solução é submetida ao escoamento turbulento, as tensões de cisalhamento quebram essas ligações, causando a desagregação das moléculas e, conseqüentemente, diminuído seu comprimento médio, fator que provoca perda de eficiência da solução. Coelho *et al.* (2016), em seus estudos de redução de arrasto com mucilagem e fibra de quiabo, supõem que a diminuição de DR seja devido a essa teoria proposta por Soares *et al.* (2015), que é ilustrado na Figura 1.4. Onde inicialmente duas moléculas de um polímero rígido estão conectadas por forças intermoleculares (em repouso) e após a aplicação de uma tensão de deformação (escoamento) ocorre a desaglomeração ou desagregação das moléculas.

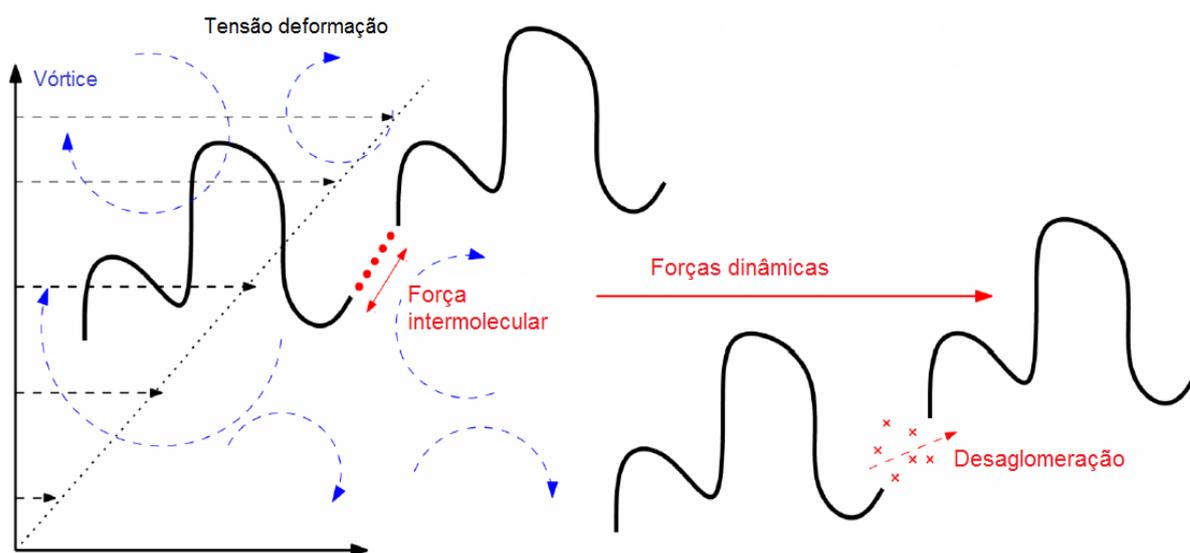


Figura 1.5 – Processo de desagregação molecular. Soares *et al.* (2015)

Visando aumentar a eficiência da redução de arrasto, a mistura de diferentes materiais passou a ser uma alternativa. Essa técnica foi reportada por diversos pesquisadores nas últimas décadas. Lee, Vaseleski e Metzner (1974) fez a primeira observação do efeito sinérgico ao se misturar polímeros e fibras. Dingilian e Ruckenstein (1974) fizeram misturas de polímeros em diferentes concentrações. Os autores usaram PEO, PAM e Carboximetilcelulose (CMC), sendo os dois primeiros flexíveis e o último rígido. Ainda de acordo com os autores, dependendo da natureza do polímero, os valores de redução de arrasto a partir da mistura desses materiais podem ser maiores ou menores, quando comparados aos efeitos individuais de cada polímero. Os autores verificaram que a mistura entre polímeros rígido e flexível proporciona grande benefício para a redução de arrasto. Os resultados obtidos com mistura apresentaram valores superiores aos obtidos pelos polímeros individualmente na mesma concentração. Uma década após os primeiros relatos sobre mistura de materiais redutores de arrasto, Reddy e Singh (1985) analisaram as misturas entre dois polímeros e polímero mais fibra no fenômeno de redução de arrasto. Eles verificaram o mesmo comportamento de efetividade quando se mistura material rígido e flexível. Os autores ainda comentaram que a sinergia entre os materiais redutores de arrasto é atribuída ao aumento do comprimento médio das moléculas, devido à presença simultânea de cada material. Além disso, foi observado pelos autores, que a resistência à degradação mecânica da mistura é próxima a média dos diferentes materiais. Para Mohsenipour e Pal (2013) e Steele, Bayer e Loth (2014) a presença de materiais diferentes em um solvente provoca mudança na conformação molecular, fazendo com que as moléculas fiquem mais alongadas ou enroladas, a depender das características dos materiais. A partir de estudos mais recentes, Sandoval e Soares (2016) argumentaram que a presença de diferentes materiais em um solvente pode induzir a formação de agregados, provocando um ganho de eficiência na redução de arrasto e resistência às tensões do escoamento turbulento. Além disso, os autores comentam que dependendo do tipo e concentração de cada material, a mistura pode apresentar desvio positivo ou negativo.

Como mencionado anteriormente, grande parte dos estudos de redução de arrasto são feitos a partir de polímeros sintéticos, como o PEO e PAM. Eles apresentam vantagens em termos de eficiência, mas, por outro lado, têm baixa resistência as tensões cisalhantes durante o escoamento turbulento, apresentam alto valor

comercial em comparação aos polímeros naturais além de serem tóxicos, fator que impede sua utilização em diversas áreas, como na medicina e no meio ambiente. Com isso, visando substituir os materiais sintéticos, vem aumentando nos últimos anos o número de pesquisadores interessados em materiais naturais (não tóxicos) para reduzir arrasto.

A Goma Xantana é um polissacarídeo obtido a partir da fermentação das bactérias *Xanthomonas Campestris* e é o material natural mais utilizado para estudos de redução de arrasto. Esse material é um polímero rígido (não degrada mecanicamente) e mais barato do que os sintéticos. Sendo assim, esse polímero é uma boa alternativa para ser utilizado em aplicações em que os sintéticos não são recomendados. As principais características desse material como agente redutor de arrasto foram estudadas por diversos pesquisadores, como Morris (1977), Muller *et al.* (1986), Bewersdorff e Singh (1988), Wyatt, Gunther e Liberatore (2011), Pereira, Andrade e Soares (2013), Andrade, Pereira e Soares (2014), Soares *et al.* (2015) Sandoval e Soares (2016) e Andrade, Pereira e Soares (2016).

Para Jaafar e Poole (2011), outro polímero natural que pode ser utilizado para reduzir arrasto é a Goma Scleroglucan, que é um polissacarídeo obtido a partir de fermentação de fungos filamentosos *Sclerotium rolfsii*. Os autores investigaram a eficiência desse polímero em um tubo circular e em um anular concêntrico. Através dos valores medidos de queda de pressão, eles verificaram que o polímero apresenta eficiência no fenômeno de redução de arrasto. Além disso, é argumentado pelos autores que o comportamento é semelhante ao da Goma Xantana e outros materiais como o Carbometilcelulose.

Como mencionado, muitas pesquisas estão sendo direcionadas para a utilização de materiais naturais redutores de arrasto, especialmente, aqueles obtidos a partir de plantas. Tais materiais são consideravelmente mais baratos que PEO, PAM e XG, porém, precisam ser mais estudados. Singh, Jaafar e Yusup (2014) comentaram sobre o potencial de polímeros naturais como DRA, em especial aqueles obtidos a partir de plantas, pois não prejudicam o meio ambiente pela contaminação do solo. Os autores utilizaram casca de banana sintetizada e convertida em Carboximetilcelulose como DRA. De acordo com os autores, o material é um bom

reductor de arrasto e é mais solúvel em concentrações mais elevadas de hidróxido de sódio (NaOH).

Phukan *et al.* (2001) realizaram uma análise comparativa entre a Goma Guar comercial e sua versão purificada, com o objetivo de melhorar a irrigação por aspersão e percolação no solo. Dessa forma, eles verificaram que sua versão purificada apresenta maior eficiência do que a comercial. Os autores também observaram que a área de irrigação aumentou além de diminuir a taxa de infiltração. Logo, os efeitos de materiais naturais redutores de arrasto são úteis para áreas com escassez de chuvas.

De acordo com Gasljevic *et al.* (2008), polissacarídeos produzidos a partir de microalgas marinhas também são capazes de reduzir arrasto. Os autores conduziram uma série de experimentos para avaliar a aplicabilidade desse material natural. Dessa forma, eles testaram várias espécies, tanto em termos de produtividade quanto em capacidade em reduzir arrasto do polissacarídeo produzido. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que muitas espécies apresentam bom desempenho em ambos os aspectos.

Outro material natural utilizado como DRA é a Nata de Coco em suspensão, conforme apresentado por Ogata e Warashina (2014). Os autores utilizaram esse material em um sistema de escoamento turbulento em dutos e obtiveram uma redução de arrasto acima de 25% para uma concentração de aproximadamente 50 ppm. Eles ainda relataram que a redução de arrasto ocorre apenas quando a Nata de Coco forma uma rede em suspensão que aumenta com o aumento do tamanho das fibras. Salehudin e Ridha (2016) também estudaram a redução de arrasto a partir de um material natural extraído da Nata de Coco e obtiveram 35% de *DR* para a concentração de 500 ppm na vazão de 2 m³/h.

A mucilagem extraída do quiabo também pode ser utilizada com DRA natural. Os principais estudos a respeito desse material foram realizados por Abdulbari e colaboradores (ABDULBARI *et al.*, 2010, 2012 e 2014). Abdulbari, Ahmad e Yunus (2010) avaliaram alguns parâmetros que influenciam na redução de arrasto, que são: diâmetro da tubulação, concentração do material e o número de Reynolds. Abdulbari, Kamarulizan e Nour (2012) estudaram a mucilagem de quiabo em dois solventes diferentes, água e hidrocarboneto líquido. Para ser solúvel em hidrocarboneto, eles

modificaram as moléculas da mucilagem. Já Abdulbari, Shabirin e Abdurrahman (2014) realizaram uma revisão a respeito de polímeros naturais com potencial para reduzir arrasto, dentre eles, encontra-se a mucilagem de quiabo. Mais recentemente, Coelho *et al.* (2016) utilizaram uma mistura de fibra e mucilagem de quiabo como DRA natural. Os autores avaliaram o comportamento da redução de arrasto à medida que a concentração era incrementada. Eles verificaram também a degradação biológica desse material além da sinergia quando misturado com o polímero flexível PEO. Todos os trabalhos mostraram boa capacidade de redução de arrasto com a utilização de material natural extraído do quiabo.

Outro material natural que pode ser utilizado como redutor de arrasto é a mucilagem de aloe vera, que é uma substância viscosa com estrutura complexa. A estrutura do principal componente do gel (origem da mucilagem) de aloe vera é ilustrada na Figura 1.6 e foi proposta por Chow *et al.* (2005). Os autores basearam-se em dados de cromatografia e análises da composição de carboidratos, de ligação e de ressonância magnética nuclear, dessa forma, verificaram que essa molécula é composta principalmente por manose, glicose e galactose, que são açúcares.

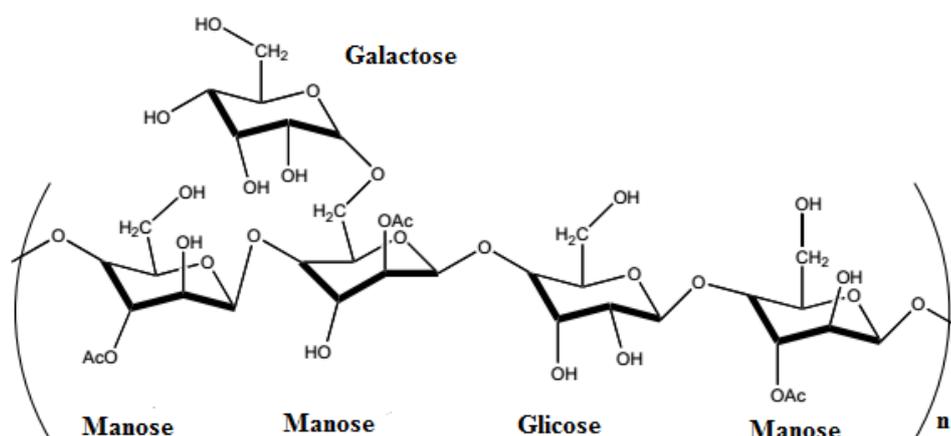


Figura 1.6 - Estrutura do principal componente do gel de aloe vera. Chow et al. (2005)

Parece não haver muitos trabalhos que estudam o efeito da mucilagem de aloe vera como redutor de arrasto. Entre os poucos trabalhos existentes, a maioria estão relacionados as aplicações medicinais. Os primeiros relatos sobre a utilização de mucilagem de aloe vera para redução de arrasto foram reportados por Kameneva *et al.* (2004) e Macias *et al.* (2004). Os autores utilizaram um fluido de ressuscitação (que apresenta características similares a do sangue) como solvente e os testes foram

feitos em cobaias animais submetidos a choque hemorrágico letal. O aumento da taxa de sobrevivência com o uso de aditivo é nítido. Sakai *et al.* (2007) utilizaram aloe vera como DRA nas artérias coronárias¹ em cobaias animais e também observaram uma redução significativa da mortalidade dos animais. Kameneva (2012) analisou a mucilagem de aloe vera como DRA para produzir efeitos hemodinâmicos em cobaias animais, como o aumento da perfusão tecidual e a diminuição da resistência vascular periférica, sem que a viscosidade seja afetada. A autora observou que um aumento na perfusão tecidual pode ser obtido sem que haja aumento da pressão arterial sanguínea, fato de extrema importância para a ressuscitação volêmica² em casos de hemorragias graves, já que o aumento na pressão arterial pode provocar hemorragias secundárias.

Abdulbari, Letchmanan e Yunus (2011) investigaram experimentalmente a mucilagem de aloe vera em escoamento turbulento em dutos. Os autores observaram resultados satisfatórios com a utilização desse material, quando a máxima redução de arrasto foi de 63% para a concentração de 400 ppm. Os estudos desses autores mostram o potencial desse material natural como DRA e o indicam como uma alternativa para os DRA sintéticos.

Apesar de poucos trabalhos a respeito da mucilagem de aloe vera em redução de arrasto, esse material tem-se apresentado um promissor DRA. Porém, muitos estudos ainda precisam ser realizados para verificar suas características e comportamentos em escoamentos turbulentos.

1.3 Caracterização do problema

A maioria dos estudos relacionados a redução de arrasto utilizam materiais sintéticos. Esses materiais não podem ser utilizados em algumas aplicações práticas, pelo fato

¹ Artérias responsáveis pela irrigação do coração e adequado funcionamento do mesmo, (BATISTA, PORTO E MOLINA, 2011).

² Medida a ser tomada para restaurar a perfusão tecidual e normatizar o metabolismo oxidativo, ou seja, garantir a manutenção do débito cardíaco (oferta e demanda de oxigênio) (RIVERS *et al.*, 2005).

deles apresentarem baixa resistência quando submetidos a altas taxas de cisalhamento e serem tóxicos e, conseqüentemente, não poderem ser utilizados na medicina e no meio ambiente. Dessa forma, os materiais naturais de redução de arrasto surgem como uma alternativa quando os sintéticos não podem ser utilizados, pois são mais resistentes às tensões cisalhantes, mais degradáveis biologicamente e não tóxicos. Logo, é clara a necessidade do desenvolvimento de novos materiais: mais baratos, mais eficientes e não tóxicos. Portanto, o presente trabalho é dedicado a pesquisa de novos DRA naturais, como a mucilagem e casca de aloe vera além de misturas desses materiais com o polímero flexível PEO. Porém, como os materiais oriundos da aloe vera não se encontram disponíveis comercialmente, foi necessário desenvolver metodologias para a produção dos mesmos.

CAPÍTULO 2

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os principais equipamentos utilizados além dos procedimentos para o preparo dos materiais estudados e testes realizados.

2.1 Equipamentos

2.1.1 Bancada experimental de redução de arrasto

Para estudos de redução de arrasto, um método bastante utilizado e que tem apresentado resultados satisfatórios é a utilização de geometrias rotativas, como reportaram: Choi e Jhon (1996), Sohn *et al.* (2001) e Andrade, Pereira e Soares (2014). No entanto, a utilização de geometrias rotativas gera regimes turbulentos que não são condizentes aos apresentados em aplicações práticas. Dessa forma, visando proporcionar uma situação de fluxo similar às aplicações práticas, diversos pesquisadores, como: Virk (1975), Bewesdorff e Singh (1988) e Elbing, Winkel e Solomon (2009) tem direcionado suas pesquisas para o estudo da redução de arrasto em escoamentos turbulentos em dutos, mesmo que este método de análise necessite de maior quantidade de solução, grande aparato experimental, elevado custo e maior tempo para a realização dos experimentos.

No presente trabalho utiliza-se uma bancada experimental que é composta por tubulações retas de seção circular por onde escoa a solução. Tal solução é deslocada por uma bomba centrífuga, modelo CAM-W6C fabricada pela empresa Dancor. Além das tubulações e da bomba centrífuga a bancada experimental possui elementos fundamentais para a realização dos testes de redução de arrasto, que são: um reservatório para preparo da solução, um medidor de vazão magnético, três transdutores de pressão estática, um vaso de pressão e um inversor de frequência para acionar a bomba centrífuga. A mesma bancada experimental foi utilizada por

Soares *et al.* (2015), Sandoval e Soares (2016) e Coelho *et al.* (2016) e pode ser observada na Figura 2.1.

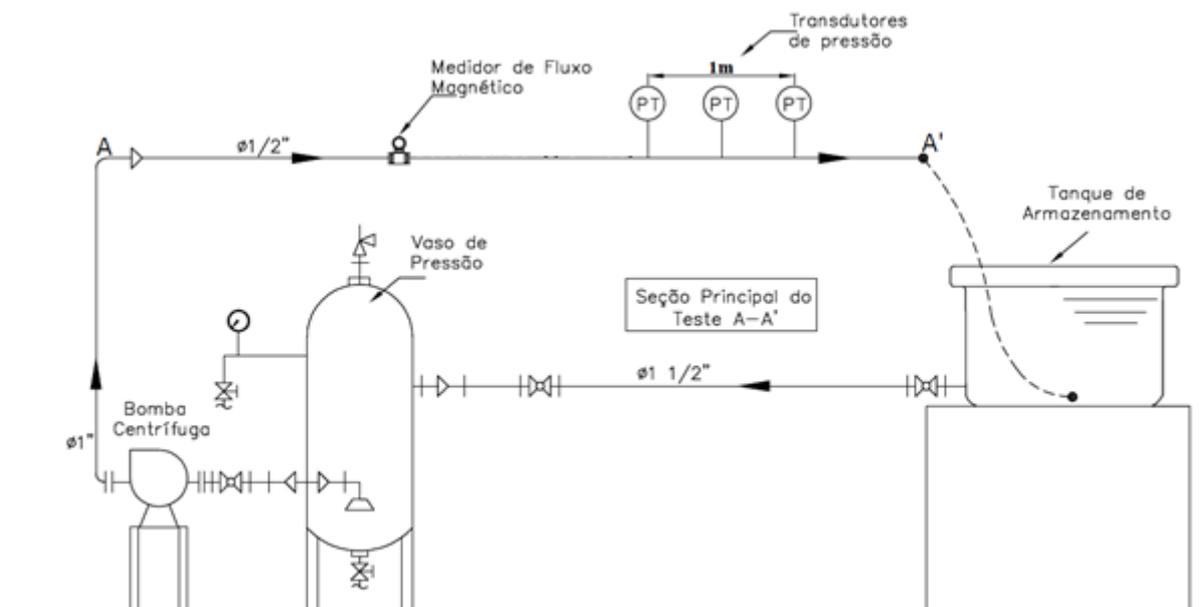


Figura 2.1 – Desenho esquemático da bancada experimental. Coelho *et al.* (2016).

Na seção principal de teste (A-A'), apresentado na Figura 2.1, temos um medidor de vazão magnético (modelo Rosemount 8732, fabricado pela empresa Emerson Progress) com incerteza de 0,5% e três transdutores de pressão estática (modelo WTP – 4010 fabricado pela empresa Warme) que possuem faixa de medição de 0 a 500 kPa (4 a 20 mA), com incerteza de 0,0057 mA. Os transdutores de pressão encontram-se localizados em um ponto onde o escoamento turbulento é completamente desenvolvido ($l/D = 400$) e são instalados em pequenos orifícios em um tubo de aço inoxidável de 1400 milímetros de comprimento, onde a distância entre as tomadas de pressão é de 500 milímetros. A tubulação onde foram instalados os transdutores de pressão possui diâmetro interno igual a 16,35 milímetros. Para garantir a medida do diâmetro interno a tubulação passou por um brunimento, para tornar este valor constante e conhecido. A medição do diâmetro foi feita por meio de micrômetro interno (Fur-o-test) em alguns pontos. A seção principal de teste (A-A') possui aproximadamente 9,7 metros de comprimento.

2.1.2 Reômetro

A análise de viscosidade das soluções utilizadas na bancada experimental é feita com o auxílio de um reômetro comercial modelo HAAKE MARS II conectado a um banho termostático tipo Thermo Haake Phoenix II, modelo P1-C50P para garantir um controle de temperatura durante os testes, ambos são fabricados pela empresa Thermo Scientific. A Figura 2.2 ilustra esses equipamentos e seus principais componentes. Para o funcionamento do rotor é necessário o suprimento de ar comprimido, que é fornecido por um compressor isento de óleo, fabricado pela empresa Schulz, modelo MSV 12/175. O mesmo reômetro foi utilizado nos trabalhos de Pereira e Soares (2012), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Andrade, Pereira e Soares (2014) e encontra-se no Laboratório de Reologia da Universidade Federal do Espírito Santo.



Figura 2.2 – Reômetro Haake Mars II.

2.1.3 Balanças

Para a pesagem da mucilagem e materiais redutores de arrasto em forma de pó utiliza-se uma balança analítica eletrônica com capacidade de 320 g, modelo ABT 302-4M fabricada pela empresa KERN & SOHN GmnH, com precisão de 0,1 mg e uma outra balança semi-analítica com capacidade de 2200 g, modelo B-TEC-2200 fabricada pela

empresa TECNAL, com precisão de 0,01 g. Para a determinação da massa do solvente utilizado no preparo das soluções, utiliza-se uma balança semi-analítica com capacidade de 50 kg, modelo WT 1000 classe III fabricada pela empresa WEIGHTTECH, com precisão de 10 g.

2.2 Produção do material de teste

O principal agente redutor de arrasto utilizado neste trabalho é a mucilagem extraída da folha da planta aloe vera, porém, obtém-se como subproduto um pó da casca dessa folha, que também é utilizado como agente redutor de arrasto.

2.2.1 Extração da mucilagem da planta aloe vera

A folha da planta aloe vera é submetida por diversas etapas de processamento até a obtenção de sua forma final a ser utilizada. Primeiramente essa folha é lavada e sua casca é removida, obtendo-se então um gel (fibra mais mucilagem), que ao final do processamento resulta no produto principal do estudo. A casca é um subproduto do processo. Após a extração do gel o mesmo passa por um mecanismo de quebra (moagem) para aumentar a eficiência de extração da mucilagem. Na sequência, a solução é filtrada em tecido (tule 100 % poliéster), retirando assim grande parte das fibras presente na solução. Este processo é apenas o primeiro de três etapas de filtragem da solução. Em seguida, a solução passa por mais duas peneiras, uma com abertura de 1,80 milímetros e outra com 250 micrometros (malha 60), ambas as peneiras estão de acordo com a norma NBR NM-ISO 3310/1. Após as etapas de filtragem, obtém-se uma solução de mucilagem concentrada e praticamente sem fibras.

A Figura 2.3 ilustra o resultado das etapas mencionadas, onde temos: a folha de aloe vera em sua forma integral (A); a extração do gel (B); o gel extraído da folha (C); o moedor de café utilizado para quebrar as estruturas do gel (moagem por cisalhamento) (D); primeira filtragem da solução, utilizando um tecido (E); peneiras utilizadas (F); última filtragem da solução (G); e a mucilagem concentrada em sua forma final (H), que é utilizada como principal agente redutor de arrasto neste trabalho.

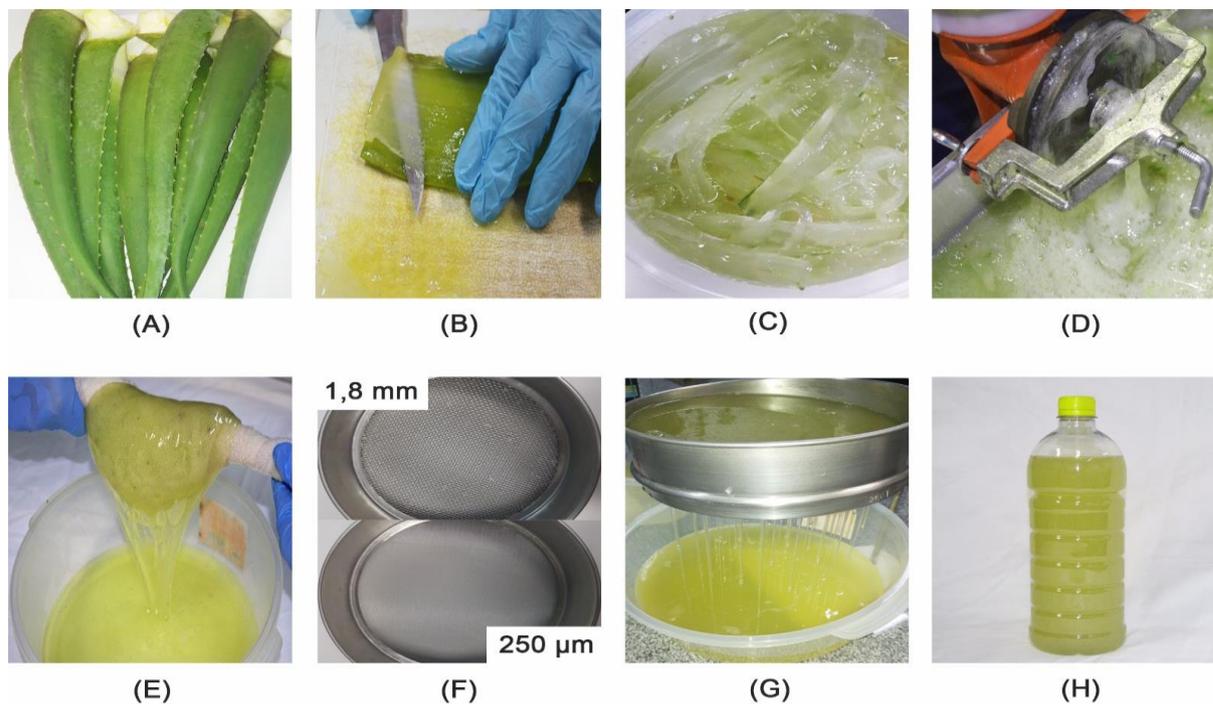


Figura 2.3 - Etapas de processamento da mucilagem.

Para análise dos principais parâmetros envolvidos na redução de arrasto é necessária grande quantidade de mucilagem homogênea, ou seja, do mesmo lote, e concentração conhecida para a realização dos testes e comparação dos resultados. Sendo assim, são adquiridos aproximadamente 125 kg de folha da planta aloe vera. Toda essa quantidade passa pelas etapas descritas na Figura 2.3 e resulta em aproximadamente 50 litros de mucilagem concentrada. Como a produção diária dessa mucilagem em nosso laboratório era baixa, foi adotado uma metodologia para armazená-la e ao final do processamento homogeneizar toda a mucilagem produzida.

A metodologia consistiu em produzir a mucilagem, armazená-la em recipientes de 2 litros e condicioná-la em um congelador. Desta forma, a mucilagem permaneceu congelada até o término da extração. Ao final do processamento, toda a mucilagem foi descongelada e homogeneizada em um recipiente de aproximadamente 50 litros. Desse volume de mucilagem homogênea, uma pequena quantidade de amostra foi retirada para determinar a concentração e o restante ficou condicionado a 0 °C por 24 horas, tempo necessário para determinar sua concentração.

Para determinar a concentração, a amostra coletada foi dividida em cinco recipientes de vidro. A massa de mucilagem em cada recipiente foi obtida por pesagem e em seguida os recipientes foram levados à estufa para secagem. Após 24 horas, quando a amostra estava completamente seca (massa constante) o recipiente foi levado à balança e a massa do polímero existente na mucilagem foi determinada. A concentração foi calculada a partir da massa da mucilagem inicial e da massa do polímero existente. A Tabela 2.1 ilustra o resultado das pesagens nessa etapa, onde cada valor de massa apresentado é o resultado de uma média de três pesagens.

Tabela 2.1 - Massas obtidas por pesagem e respectivas concentrações.

Amostras	Massa da mucilagem (g)	Massa do polímero (g)	Concentração (ppm)
1	141,2326	1,7745	12564
2	144,6988	1,8363	12690
3	141,2289	1,7822	12619
4	141,6000	1,7939	12669
5	145,3398	1,8522	12744
		Média	12657

Uma vez determinada a concentração da mucilagem, os 50 litros foram divididos em recipientes menores e armazenados no congelador novamente. A quantidade em cada um dos recipientes foi determinada a partir da concentração da mucilagem, da concentração de cada teste a ser realizado e assumindo que todos os testes foram feitos com o volume de solução final igual a 100 litros.

2.2.2 Produção do pó da casca da folha de aloe vera

Como dito anteriormente, o pó da casca da folha de aloe vera é um subproduto do processo de extração da mucilagem e também é utilizado como agente redutor de arrasto neste trabalho.

Após a remoção do gel, a casca passa por algumas etapas de processamento até atingir sua forma final a ser utilizada. Primeiramente, ela foi levada até uma estufa e mantida a uma temperatura de aproximadamente 50 °C, permaneceu na estufa o tempo necessário para atingir um valor de massa constante. Após a secagem, a mesma foi triturada em um liquidificador e encaminhada a um processo de

peneiramento. Uma faixa de peneiras (de acordo com a norma NBR NM-ISO 3310/1) foi utilizada e a abertura mais fina foi de 106 micrometros (malha 140), dessa forma, foi realizado um controle do tamanho das fibras. Esse mesmo processo foi utilizado por Coelho *et al.* (2016) na obtenção de pó do quiabo. Os resultados dessas etapas podem ser observados na Figura 2.4. Nessa figura temos: a folha de aloe vera em sua forma integral (A); a casca da folha após a extração do gel (B); a casca após o processo de secagem (C); e o pó da casca (D).

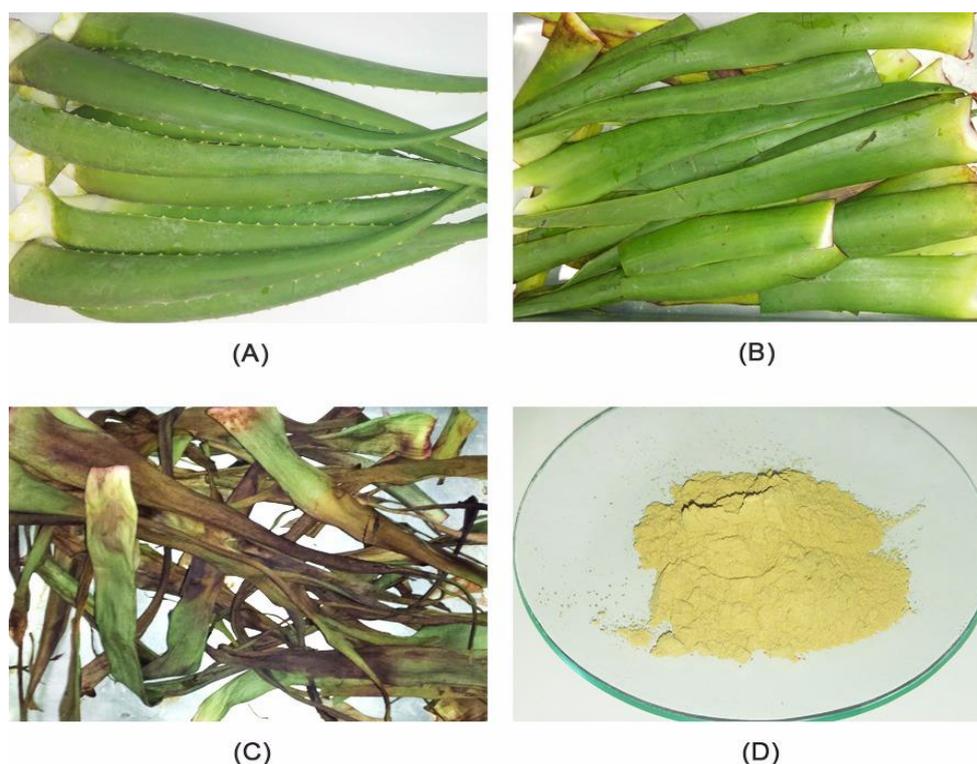


Figura 2.4 - Etapas de processamento da casca da folha de aloe vera

2.3 Descrição dos testes no aparato experimental

A partir do esquema apresentado na Figura 2.1, inicialmente uma quantidade de solvente (água filtrada) é depositada no tanque de armazenamento, em seguida é adicionada uma quantidade do material a ser estudado, até atingir a concentração a ser avaliada, totalizando 100 litros de solução preparada no tanque de armazenamento. Como a mucilagem encontra-se congelada, a solução é deixada em repouso no tanque de armazenamento tempo suficiente para que a mucilagem descongele e entre em equilíbrio térmico com o meio. Já para o pó da casca, o mesmo

é deixado em repouso no reservatório tempo suficiente para que haja a liberação e diluição de algum polímero presente. Esse tempo foi determinado baseando-se no trabalho de Coelho *et al.* (2016), onde os autores utilizam 2 horas de repouso para o pó obtido do quiabo. Na sequência, para ambos os casos, a solução é misturada suavemente por 5 minutos para sua total homogeneização.

Uma vez realizado o preparo da solução no tanque de armazenamento, uma amostra é retirada para determinar a viscosidade e o restante da solução é escoado lentamente por ação da gravidade até o vaso de pressão, através de uma tubulação de 1,5". A partir do momento em que toda a solução se encontra no vaso de pressão, uma bomba centrífuga é acionada a 3000 rpm para impulsioná-la, permitindo seu escoamento através do circuito hidráulico de teste, que possui 13,5 metros de comprimento. A solução é depositada novamente no tanque de armazenamento. Todos os testes são realizados a uma temperatura média de 25°C.

Os sinais de pressão e vazão são adquiridos por uma placa de aquisição de dados NI – 6008 (fabricada pela empresa National Instruments) que é capaz de realizar leituras em tempo real dos transdutores de pressão e do medidor de vazão. Esses dados são armazenados no banco de dados do LabView e podem ser extraídos a qualquer momento do teste.

Quando toda a solução, a princípio no vaso de pressão, é escoada pela tubulação de teste e retornada para o tanque de armazenamento, um ciclo de leitura de dados é realizado. Na sequência, uma válvula é aberta permitindo que a solução polimérica com moléculas parcialmente desagregadas retorne por gravidade novamente ao vaso de pressão, completando assim um ciclo (ou um passe). Essa mesma solução é utilizada para o próximo ciclo. Assim, o experimento é executado até não haver variação de resultado devido ao efeito da desagregação.

O teste é realizado passe por passe e o fator de atrito é calculado a cada ciclo de leitura de dados. Em cada passe executado ocorre a desagregação do polímero e como consequência verifica-se um aumento do fator de atrito. Para alcançar o valor constante do fator de atrito, para a mesma rotação da bomba, são necessários 20, 30 ou 40 passes, a depender da concentração polimérica da solução.

Conhecidos a massa específica (ρ), a viscosidade dinâmica da solução (η), a velocidade média do escoamento (\bar{u}) e com o diâmetro interno da tubulação (D), o número de Reynolds é calculado através da Equação 4.

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

A partir da diferença de pressão na seção de teste, assumindo-se diâmetro constante e escoamento completamente desenvolvido, o fator de atrito de Darcy da bancada experimental é calculado pela Equação 5.

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

A percentagem da redução de arrasto, $\%DR$, é determinada através da definição de Lumley (1969): $\%DR = (1 - f/f_0) \times 100$. Em que f_0 e f são o fator de atrito do solvente e da solução polimérica, respectivamente.

Com o transcorrer do teste a solução polimérica perde eficiência. Essa perda pode ser medida através da redução de arrasto relativa, conforme apresentada na Equação 6.

$$DR' = \frac{DR(t)}{DR_{m\acute{a}x}} \quad (6)$$

Sendo que $DR(t)$ é a redução de arrasto em cada passe e $DR_{m\acute{a}x}$ é a máxima redução de arrasto, que ocorre no primeiro passe, quando o polímero presente na solução ainda não está desagregado.

2.3.1 Testes para análise do efeito da variação de concentração

Uma vez descrito o procedimento de teste na bancada experimental, realizam-se testes com o objetivo de avaliar a capacidade de redução de arrasto à medida que a concentração do material na solução é variada. Assim, são preparadas soluções em diferentes concentrações (50, 100, 200, 400, 800 e 1600 ppm) no tanque de armazenagem. Investiga-se nesse procedimento a influência da variação da concentração na capacidade de redução de arrasto absoluto e individualmente no aumento de vazão e na queda de pressão além de avaliar as variações da redução de arrasto máxima e mínima durante os testes.

2.3.2 Testes de degradação biológica

Para verificar a influência da degradação biológica do material na capacidade de redução de arrasto, uma mudança no procedimento descrito é realizada. Nesse caso, após a realização do teste, quando se atinge valor constante do fator de atrito, a solução ao invés de ser descartada é estocada em recipientes vedados de 50 litros, à temperatura ambiente (25°C), e posteriormente reutilizada em períodos de tempo determinados. Para a mesma solução, os tempos de estocagem utilizados são de 1, 2, 3, 4 e 5 dias em sequência. Após cada período de tempo, são realizados novos passes, até atingir valor constante do fator de atrito.

2.3.3 Medição da viscosidade

Antes do início de cada teste na bancada experimental, uma pequena amostra da solução polimérica é coletada do reservatório para medir a viscosidade. A medição da viscosidade é realizada em uma geometria rotativa composta por cilindros concêntricos de dupla folga (*Double Gap*), que pode ser observada na Figura 2.5.

O teste de viscosidade consiste em variar a velocidade angular no rotor de 0 a 3000 rotações por minuto (rpm) em um intervalo de 600 segundos. Nesse período, os dados são obtidos linearmente a cada segundo. A taxa de cisalhamento, taxa de deformação, viscosidade e outras propriedades do fluido são obtidos como resultado

de saída pelo reômetro. Dentre esses dados de saída, a viscosidade é o de maior interesse, pois é utilizado para o cálculo de redução de arrasto na bancada experimental.

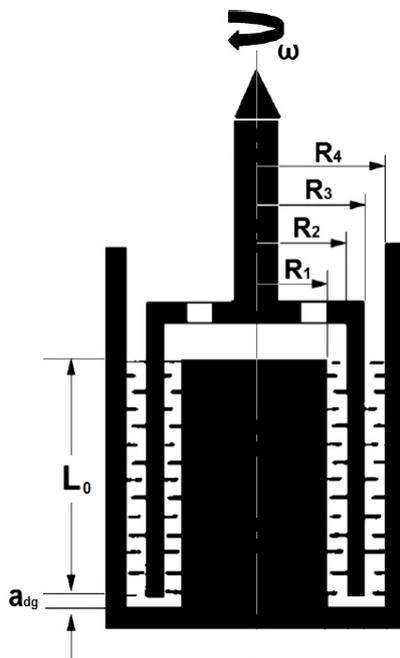


Figura 2.5 – Geometria utilizada para medir a viscosidade da solução. Pereira, Andrade e Soares (2013).

O valor da viscosidade da solução é medido na faixa de rotação do rotor onde o escoamento está em regime laminar, especificamente nos últimos valores de viscosidade antes dos mesmos começarem a aumentar com o incremento da rotação (ponto de mínimo da curva de viscosidade – ver Figura 3.5), pois a partir desse valor o escoamento passa a ficar turbulento e ocorre as primeiras instabilidades. Além disso, de acordo com Pereira e Soares (2012), os resultados de viscosidade medidos nessa faixa de rotação estão de acordo com os obtidos em viscosímetros capilares. A medição da viscosidade é feita a uma temperatura controlada de 25 °C, que corresponde a temperatura média dos testes realizados na bancada.

2.4 Critério estatístico para rejeição dos dados

Durante o escoamento da solução pelas tubulações do aparato experimental, os dados do medidor de vazão e dos transdutores de pressão são obtidos em tempo real

e armazenados no programa LabView. O tempo necessário para a solução ser deslocada do vaso de pressão até o tanque de armazenagem é de aproximadamente 60 segundos e, são obtidos 60 dados nesse período, quantidade suficiente para a análise. No momento da leitura dos valores de vazão e pressões, algumas perturbações no processo podem provocar variações dos mesmos e formar um conjunto de valores discrepantes, conhecidos como dados atípicos. Dentre os valores de vazão e pressões coletados, é tomado um valor médio representativo para cada parâmetro, porém, para isso, os dados atípicos precisam ser eliminados para que não interfiram no resultado médio. Assim, faz-se necessário a utilização de um critério para rejeição de dados atípicos, que neste trabalho é o critério estatístico de Chauvenet. Esse critério consiste em identificar, dentro de uma mesma amostragem de dados, valores que são discrepantes aos demais. A Tabela 2.2 apresenta valores estabelecidos pelo critério utilizado neste trabalho para a razão entre o máximo desvio aceitável (d_{max}) e o desvio padrão (σ), para vários números de amostras (N).

Tabela 2.2 - Critério de Chauvenet.

Número de Amostras (N)	d_{max}/σ
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,8
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
60	2,62
100	2,81
500	3,29
1000	3,48

Para que o critério de Chauvenet seja aplicado, é necessário primeiro calcular a média e o desvio padrão dos valores de vazão e pressões. Na sequência, é determinado o desvio pontual de cada valor do conjunto de dados. O próximo passo é fazer uma razão entre cada desvio pontual e o desvio padrão e compará-la com o valor correspondente na Tabela 2.2. Caso o valor absoluto dessa razão seja superior ao aceito pelo critério, o valor correspondente é descartado. No caso deste trabalho, como são adquiridos 60 dados por passe, adotou-se a razão entre o máximo desvio

aceitável e o desvio padrão como 2,62. Após a eliminação dos dados atípicos, uma nova média e um novo desvio padrão são cálculos.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados primeiramente os resultados preliminares, seguidos pelos resultados obtidos com a variação da concentração da mucilagem de aloe vera, análise de degradação biológica, comparação entre diferentes materiais redutores de arrasto e, por fim, resultados com misturas de mucilagem e casca de aloe vera com Óxido de Polietileno.

3.1 Resultados preliminares

3.1.1 Validação da bancada

Como mencionado, um trecho da seção principal de teste (região em que os transdutores de pressão estão instalados) é composto de aço inoxidável com brunimento, dessa forma, a rugosidade nesse trecho de tubulação é baixa, pois a mesma fica coberta pela subcamada laminar e o escoamento pode ser considerado como se fosse em um tubo liso.

Para realizar o experimento de avaliação da bancada experimental, são utilizados 100 litros de água filtrada. O teste consiste na realização de diversos passes pela tubulação de teste e, para cada passe é utilizada uma rotação diferente da bomba, que corresponde a um valor de número de Reynolds. Como o número de Reynolds varia para cada passe, temos a seguinte faixa de variação de Reynolds: 55000 até 100000, faixa na qual os experimentos com as soluções poliméricas são realizados.

Uma vez realizado o experimento de validação, o fator de atrito da bancada experimental é calculado de acordo com a definição de Darcy (Equação 5) e analisado em função do número de Reynolds, como podemos observar na Figura 3.1, onde a linha preta tracejada representa o fator de atrito para escoamento em regime laminar ($f = 64/Re$). 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

($f_{blasius} = 0,316 * Re^{-0.25}$). 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 filtrada, que estão bem próximos aos valores teóricos da correlação de Blasius.

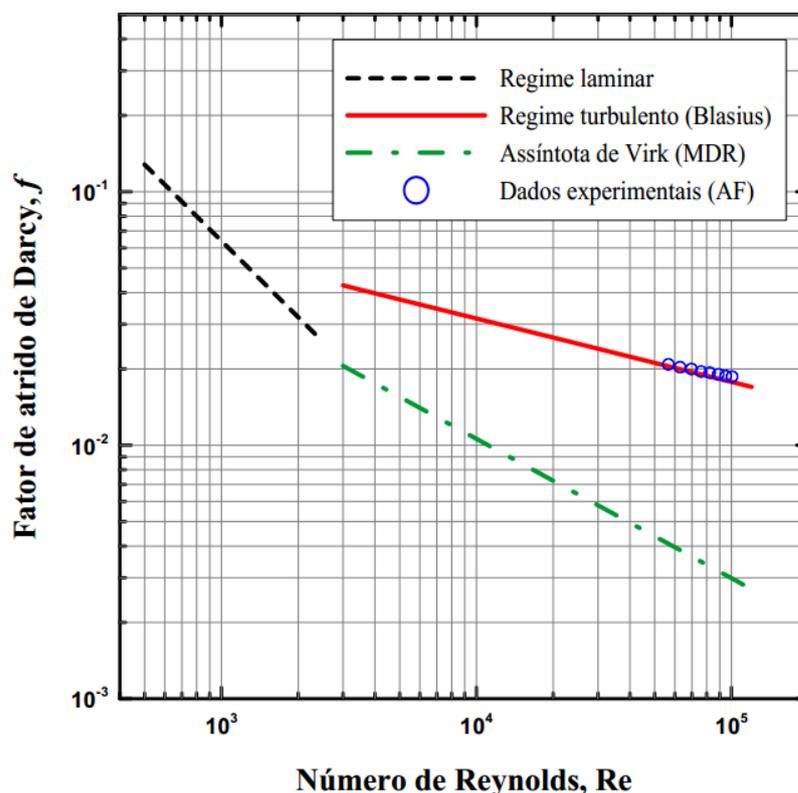


Figura 3.1 – Teste de validação da bancada experimental.

Já que o escoamento no interior tubo da seção de teste é considerado como se fosse em tubo liso, pode-se comparar os resultados experimentais com a correlação de Blasius. É observado na Figura 3.1 um aumento na diferença entre os valores medidos e a correlação de Blasius à medida que o número de Reynolds aumenta, porém aparentemente os resultados experimentais estão bem próximos aos valores teóricos, sendo que a máxima diferença entre eles é de aproximadamente 5%, que corresponde ao maior valor de número de Reynolds, mostrando assim uma boa precisão da bancada experimental. Por mais que os valores experimentais com água filtrada estejam próximos aos teóricos, é estimada uma expressão de fator de atrito em função do número de Reynolds da bancada experimental, que corresponde aos dados experimentais obtidos com água filtrada. Essa expressão é utilizada para o

cálculo de percentual de redução de arrasto das diferentes soluções estudadas neste trabalho. Assim, a expressão do fator de atrito da bancada experimental é dada pela Equação 7.

$$f_{bancada} = 0,1743 * Re^{-0,194}. \quad (7)$$

3.1.2 Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões

Foram realizados alguns experimentos com o objetivo de iniciar a investigação na capacidade em reduzir arrasto do material principal deste trabalho. Primeiramente, plantas aloe vera foram adquiridas de diferentes regiões e suas folhas foram processadas de acordo com a Figura 2.3. Porém, para os testes preliminares, foi utilizado um espremedor de batatas (moagem por esmagamento) na etapa de quebra do gel.

Após o processamento da mucilagem de cada região, uma amostra é retirada para determinar a concentração, de acordo com a subseção 2.2.1, e o restante é direcionado à bancada experimental para que o teste seja realizado no mesmo dia da extração para evitar uma possível degradação biológica da mucilagem, seguindo o procedimento descrito na seção 2.3. Dessa forma, o experimento é realizado sem saber o valor da concentração, pois a mesma só é conhecida após 24 horas da extração da mucilagem. Assim, foram realizados testes com mucilagens de duas regiões e os resultados preliminares de redução de arrasto por número de passes são apresentados na Figura 3.2. Para cada região foram utilizados 2 Litros de mucilagem para realizar os testes, esse volume corresponde ao total de mucilagem produzida no dia, descontado das amostras retiradas para determinar a concentração. As folhas de aloe vera da Região A (quadrados azuis) e Região B (círculos pretos) foram colhidas no mês de setembro nas cidades de Cachoeiro de Itapemirim e São Matheus, respectivamente, ambas as cidades pertencem ao estado do Espírito Santo.

De acordo com a Figura 3.2, por mais que os resultados de redução de arrasto estejam coerentes (o aumento da concentração representa um aumento nos valores de redução de arrasto), pode-se observar que as mucilagens extraídas de plantas de

diferentes regiões apresentam concentrações diferentes para o mesmo volume. Ainda se verifica que as tendências são similares e a variação entre as curvas é praticamente constante com o transcorrer dos testes.

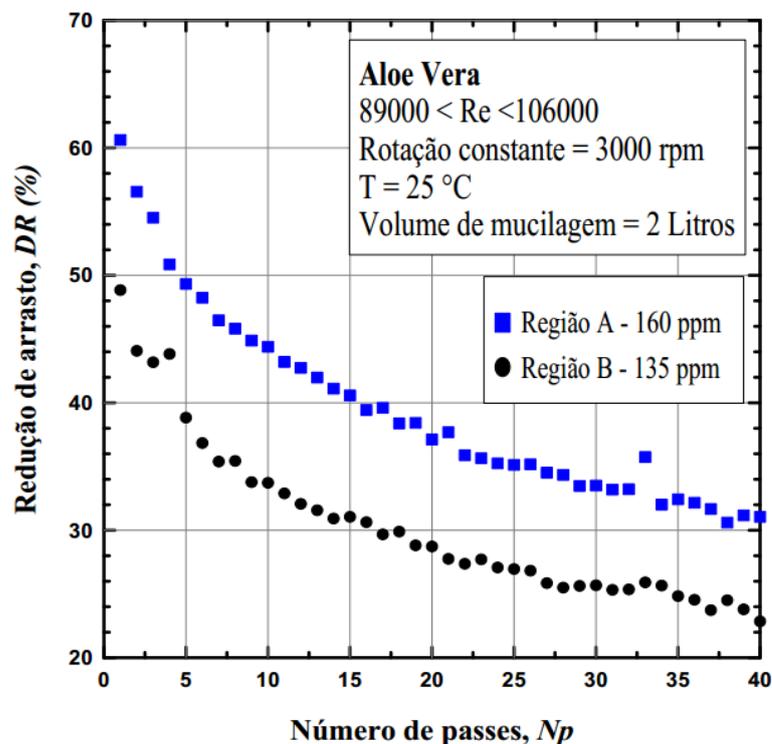


Figura 3.2 – Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões: concentrações diferentes.

Outro fator importante observado nos resultados preliminares e que também está relacionado às plantas de diferentes regiões, pode ser visto na Figura 3.3, onde os resultados de outro teste com planta de outra região (Região C) são apresentados. As folhas de aloe vera utilizadas na Região C (losangos vermelhos) foram colhidas no mês de setembro na cidade de Pancas, Espírito Santo. Os volumes de mucilagem utilizados para obtenção dos resultados apresentados na Figura 3.3 foram de 2 Litros e 750 mL para as Regiões A e C, respectivamente. Esses volumes são correspondentes aos produzidos no dia para a realização do teste, descontados das amostras retiradas para determinar a concentração. Verifica-se nessa figura que mucilagens de diferentes regiões podem apresentar resultados de redução de arrasto próximos, mesmo em concentrações e volumes de mucilagem diferentes. Esse fato, e o apresentado na Figura 3.2, pode estar relacionado a inúmeros aspectos, como: a quantidade de polímero responsável pela redução de arrasto presente na mucilagem, o peso molecular dos polímeros ali presentes e a composição da mucilagem.

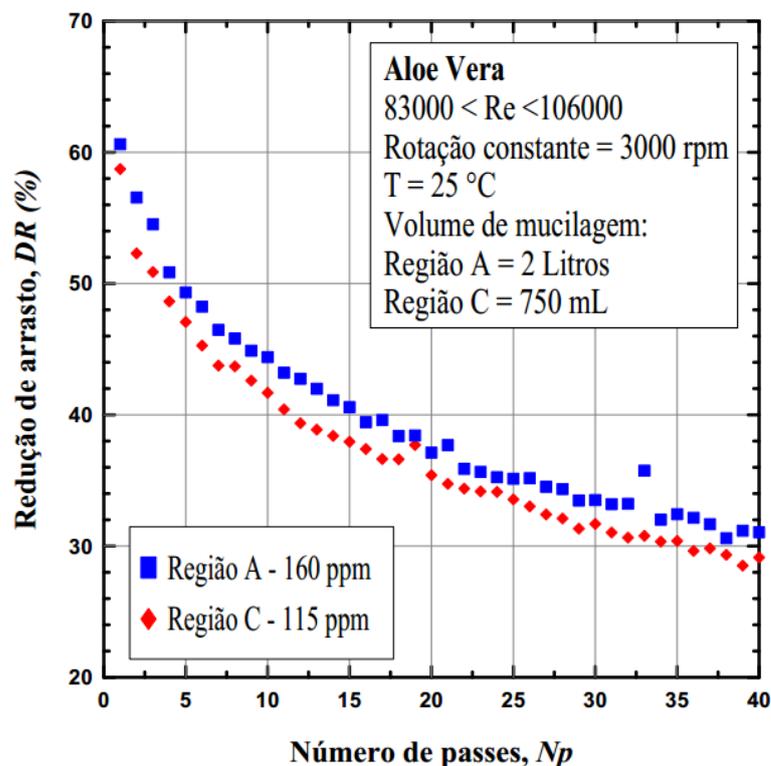


Figura 3.3 - Análise de plantas aloe vera de diferentes regiões: resultados próximos com concentrações diferentes.

Como observado nas Figuras 3.2 e 3.3, há uma dificuldade na garantia de algumas variáveis importantes no fenômeno de redução de arrasto quando se trabalha com plantas de diferentes regiões, ou seja, os resultados acabam não tendo uma base de comparação. Dessa forma, faz-se necessário a investigação de um método para armazenar a mucilagem de aloe vera produzida. Sendo assim, outros testes preliminares são realizados com esse intuito.

3.1.3 Análise de armazenagem da mucilagem e repetitividade dos testes

Para os testes de armazenagem, foram produzidos aproximadamente três litros de mucilagem da Região C. Desse volume, três recipientes receberam 750 mL de mucilagem e o restante foi dividido em recipientes de vidro para determinar a concentração. Dos três recipientes contendo 750 mL de mucilagem, um foi utilizado para realizar um teste na bancada experimental no mesmo dia da produção da mucilagem, e os outros dois foram armazenados, um na geladeira por 24 horas a 4°C

e outro no congelador por 48 horas a -10°C . Após o período de armazenagem os mesmos foram utilizados na bancada experimental para a realização dos testes.

A Figura 3.4 mostra os resultados de redução de arrasto por número de passes obtidos para os testes de armazenagem. Nessa figura pode ser observado que os dois métodos de armazenagem que a mucilagem foi submetida (respeitando do tempo de armazenagem) apresentaram resultados semelhantes aos obtidos com o teste realizado no dia do processamento da mesma. Com isso, pode-se dizer que, dentro do cenário apresentado, os métodos de armazenagem são razoáveis.

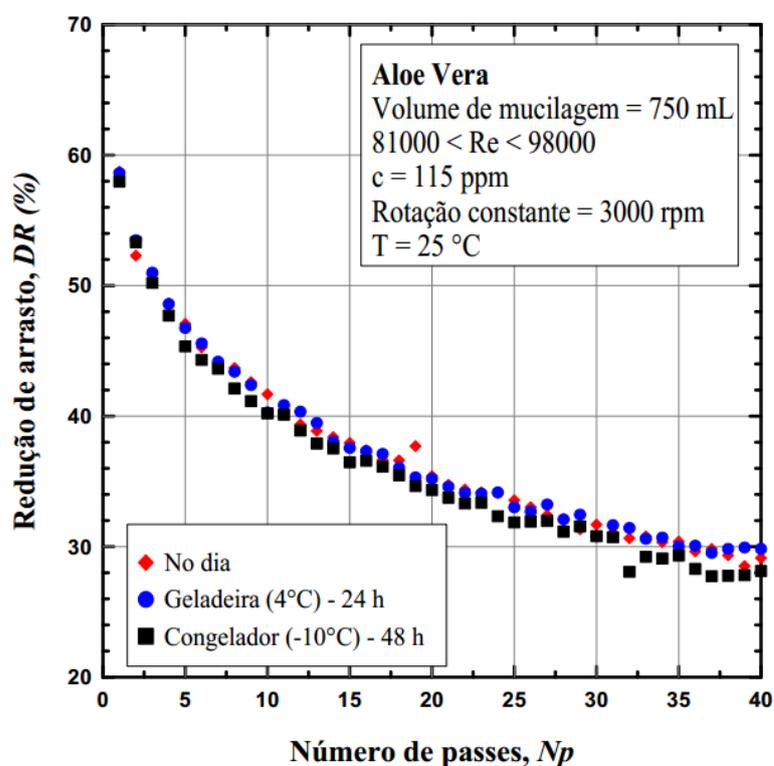


Figura 3.4 - Teste de armazenagem: análise na bancada experimental.

Ainda de acordo com a Figura 3.4, vale ressaltar que, para a concentração de 115 ppm, os resultados de redução de arrasto, utilizando a mucilagem de aloe vera da Região C, são bem satisfatórios quando comparados a outros polímeros naturais e até mesmo sintéticos em concentrações um pouco menores (100 ppm). A curva de redução de arrasto para essa mucilagem atingiu $DR_{máx}$ de quase 60% e DR_{assint} de aproximadamente 30%. Para a XG, que é um polímero rígido, Coelho *et al.* (2016) atingiram valores de $DR_{máx}$ e DR_{assint} para a XG de 40% e 22%, respectivamente; já para a mistura de fibra e mucilagem de quiabo, que também é rígido, os autores

obtiveram valores de $DR_{m\acute{a}x} = 12\%$ e $DR_{assint} = 6\%$; e para o PEO de $M_v = 4 \times 10^6$ g/mol (flexível) encontraram os valores de $DR_{m\acute{a}x} = 28\%$ e $DR_{assint} = 1\%$.

Na Figura 3.4, pode-se observar a reprodutibilidade dos resultados, onde diferentes soluções, com a mesma concentração e da mesma safra, foram testadas na bancada experimental e os resultados obtidos para os três testes foram bem próximos, apresentando uma variação percentual média de 4%, indicando boa repetitividade.

Além dos resultados obtidos na bancada experimental para os testes de armazenagem, foi feita uma análise de viscosidade com as mesmas soluções utilizadas nesses testes, a partir das pequenas amostras coletadas antes de cada teste. Os resultados de viscosidade dinâmicas das soluções podem ser observados na Figura 3.5.

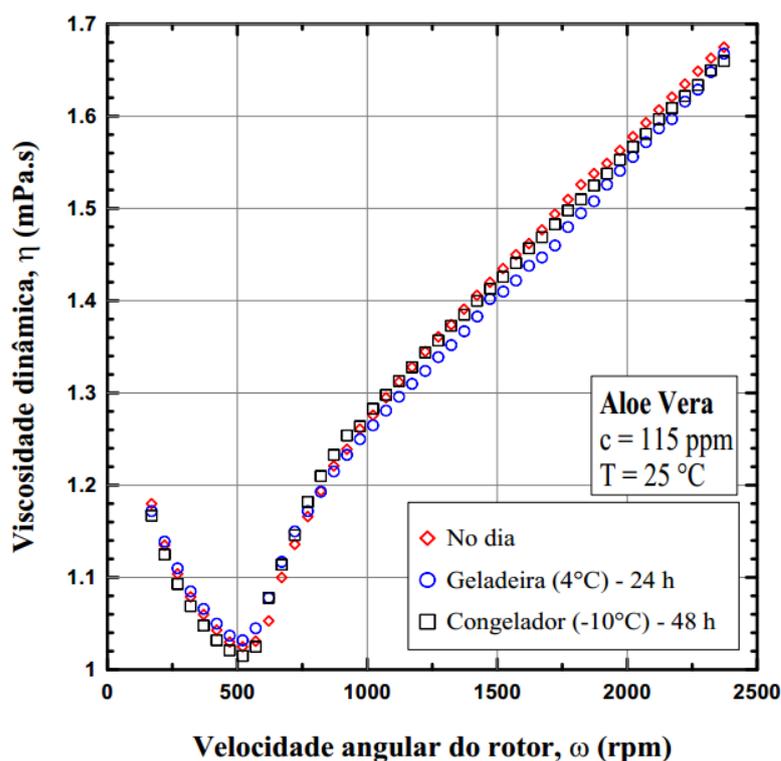


Figura 3.5 - Teste de armazenagem: análise no reômetro.

Verifica-se na Figura 3.5, assim como nos resultados da bancada experimental, que os valores de viscosidade para os dois métodos de armazenagem são praticamente idênticos aos obtidos com o teste realizado no mesmo dia do processamento da mucilagem. Vale ressaltar ainda que, para cada teste na bancada experimental, o valor de viscosidade utilizado para calcular o número de Reynolds é obtido no ponto

de mínimo da curva de viscosidade (curvas similares a apresenta na Figura 3.5), de acordo com a subseção 2.3.3.

A partir dessas análises preliminares, foi decidido obter um novo lote de folhas da planta aloe vera, pertencente a mesma região das plantas utilizadas para os testes de armazenagem, e processá-las. A diferença de tempo entre a colheita de um lote para o outro foi de aproximadamente 2 meses e essa colheita foi feita de forma aleatória.

Com o objetivo de aumentar a produção diária e armazenar a mucilagem, o método de processamento utilizado nos testes preliminares foi adaptado em dois aspectos, como a substituição do espremedor de batatas por um moedor de café e após o primeiro congelamento, todo o volume de mucilagem foi descongelado e homogeneizado, para determinar a concentração e, após isso, foi congelado novamente em quantidades pré-determinadas e concentração conhecida. Esse novo método de processamento (método principal) está de acordo com o apresentado na seção 2.2.1 e é utilizado para realizar os principais testes deste trabalho. Porém, após todo o processamento do novo lote de mucilagem, através do método principal, verificou-se uma perda de eficiência nos resultados de redução de arrasto, quando comparado ao método preliminar. A Figura 3.6 ilustra a perda de eficiência provocada pela mudança no método de processamento, onde observa-se que os resultados obtidos com o método preliminar, mesmo na concentração de 115 ppm, são bem superiores aos resultados obtidos para o método principal, para as concentrações de 100 e 200 ppm.

Logo, é notório a perda de eficiência do novo lote de mucilagem, devido as alterações no método de processamento. Porém, como aproximadamente 50 litros de mucilagem já estavam processados, foi decidido realizar os testes principais com esse lote de material. Os resultados obtidos são satisfatórios e apresentam eficiência maior do que outros materiais redutores de arrasto. Mas, é importante que seja investigado o porquê da perda de eficiência com a mudança do método, fato que não foi abordado no presente trabalho, pois necessitaria de obter uma nova quantidade de aloe vera, dessa forma, fica como sugestão para trabalhos futuros.

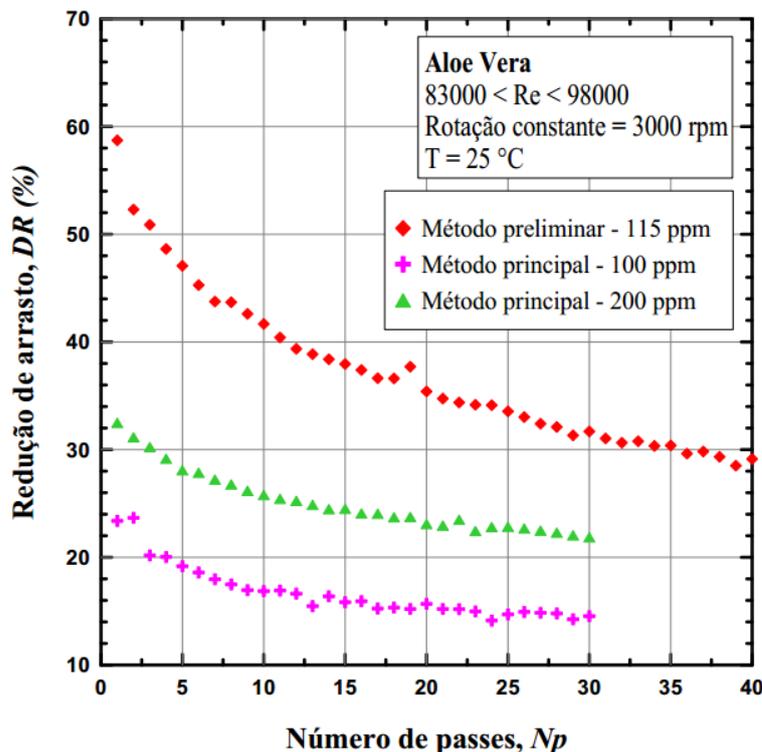


Figura 3.6 - Análise da mudança de método para a extração da mucilagem.

3.2 Influências da concentração na redução de arrasto absoluta.

Os testes para analisar o efeito da concentração na redução de arrasto absoluta seguem o procedimento descrito na seção 2.3 do capítulo anterior, no qual a solução é impulsionada por uma bomba centrífuga, à rotação constante de 3000 rpm, através da bancada experimental repetidas vezes (vários passes). Para cada teste foram realizados 20 ou 30 passes, a depender da concentração. Esses testes foram feitos a uma temperatura média de 25 °C em seis concentrações diferentes (50, 100, 200, 400, 800 e 1600 ppm) e os resultados são apresentados na Figura 3.7. Nessa figura é possível observar que a redução de arrasto aumenta à medida que a concentração do agente redutor de arrasto na solução é incrementada. Esse aspecto já foi reportado por Lumley (1973), Virk (1975) e Vanapalli, Oslam e Solomon (2005). Particularmente para estudos de redução de arrasto com polímero natural extraído da planta aloe vera Kameneva *et al* (2004), Abdulbari, Letchmanan e Mohd (2011) e Marhefka e Kameneva (2016) também reportaram o efeito da concentração.

Ainda de acordo com a Figura 3.7, é importante mencionar que o efeito que ocorre durante o tempo de resistência, t_r , termo apresentado por Pereira e Soares (2012), no qual a solução polimérica se mantém um breve tempo na máxima redução de arrasto, não é observado nesse caso, pois devido ao escoamento turbulento e as altas taxas de cisalhamento na bomba, os polímeros presentes na mucilagem, ao passar pela primeira vez no aparato experimental já sofrem um processo de desagregação parcial. Agora, analisando $DR_{m\acute{a}x}$, observa-se que à medida que a concentração aumenta, o valor de $DR_{m\acute{a}x}$ 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. Entre as concentrações analisadas, a máxima redução de arrasto observada com a mucilagem extraída da planta aloe vera foi de aproximadamente 71% para a concentração de 1600 ppm. Por outro lado, analisando DR_{assint} , observa-se que nos passes finais, para todas as concentrações, os valores de redução de arrasto tendem a se manter constante e independente do número de passes, isso ocorre devido ao processo de desagregação após a realização de diversos passes.

A Figura 3.8 apresenta apenas os valores máximos e assintóticos de redução de arrasto de cada concentração analisada. Pelo fato do material utilizado neste trabalho apresentar baixa perda de eficiência, é possível observar nessa figura que as curvas de $DR_{m\acute{a}x}$ e DR_{assint} apresentam comportamento semelhantes, onde seus valores aumentam com o aumento da concentração e tendem a atingir um patamar máximo da capacidade do material, em uma concentração crítica, dessa forma, o aumento da concentração é incapaz de trazer ganhos em termos de redução de arrasto devido ao aumento excessivo da viscosidade.

Ainda é possível observar na Figura 3.8, que para concentração de 1600 ppm os valores de redução de arrasto máximo e assintótico apresentam uma diferença entre eles menor do que em outras concentrações, ou seja, estão tendendo a um valor constante de redução de arrasto. Isso indica que a solução está ficando mais resistente. Porém, é esperado que a eficiência da redução de arrasto caia se a concentração for incrementada além desse ponto, pois a viscosidade da solução tende a aumentar consideravelmente.

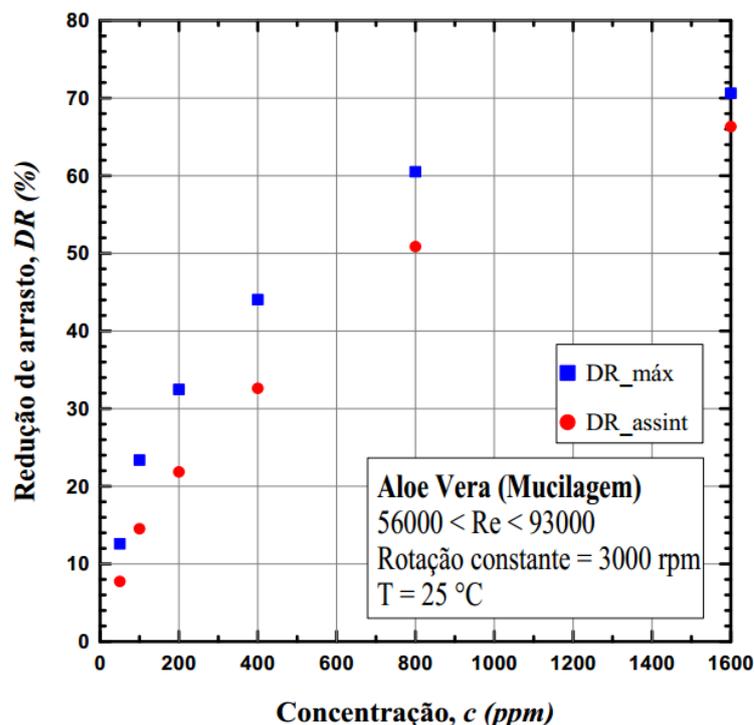


Figura 3.8 - Efeito da concentração na redução de arrasto máxima e assintótica.

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

De acordo com a equação do fator de atrito de Darcy (Equação 5) utilizada neste trabalho e sabendo que os valores de massa específica, comprimento e diâmetro da tubulação são constantes, os únicos parâmetros que influenciam no fator de atrito são a vazão e a queda de pressão. Dessa forma, com o objetivo de avaliar a eficiência da mucilagem de aloe vera de um ponto de vista mais prático, os resultados obtidos na Figura 3.7 são agora analisados em termos de vazão e queda de pressão, pois o ganho na vazão e a diminuição da queda de pressão são os fatores que permitem reduzir custos no transporte de escoamento em tubulações.

Analisando o comportamento da vazão (Figura 3.9), observa-se que a vazão aumenta à medida que a concentração é incrementada. Para a concentração de 1600 ppm a vazão assume valor máximo de 5,21 m³/h para o primeiro passe, o que representa um ganho de 1,54 m³/h (42%) em relação ao solvente (água filtrada – representada pela linha preta contínua). Já o valor assintótico de vazão para a mesma concentração é de 4,96 m³/h (34%) quando comparado com o solvente. A diferença da máxima e

mínima vazão para essa concentração é de apenas 0,25 m³/h (uma queda de 5%). Aliás, entre as concentrações analisadas, foi verificada uma variação máxima ($(Q_{máx} - Q_{assint})/Q_{máx}$) de 7% para a concentração de 800 ppm. Isso mostra mais uma vez a baixa perda de eficiência do material devido ao mecanismo de desagregação e, conseqüentemente, boa resistência dos polímeros presentes na mucilagem de aloe vera em comparação aos polímeros flexíveis PEO e PAM, apresentados no trabalho de Sandoval e Soares (2016). Os autores utilizam o mesmo aparato experimental, porém o deslocamento da solução foi feito a partir de ar comprimido ao invés da bomba centrífuga, gerando um escoamento menos agressivo, mesmo assim, eles mostram que para soluções de 200 ppm de PEO e PAM as perdas causadas pela degradação dos polímeros flexíveis correspondem a 26% e 19%, respectivamente. Dessa forma, a característica de baixa perda de eficiência dos polímeros presentes na mucilagem de aloe vera é uma vantagem quando se deseja realizar um escoamento de fluido por um longo percurso, uma vez que a variação na vazão é baixa.

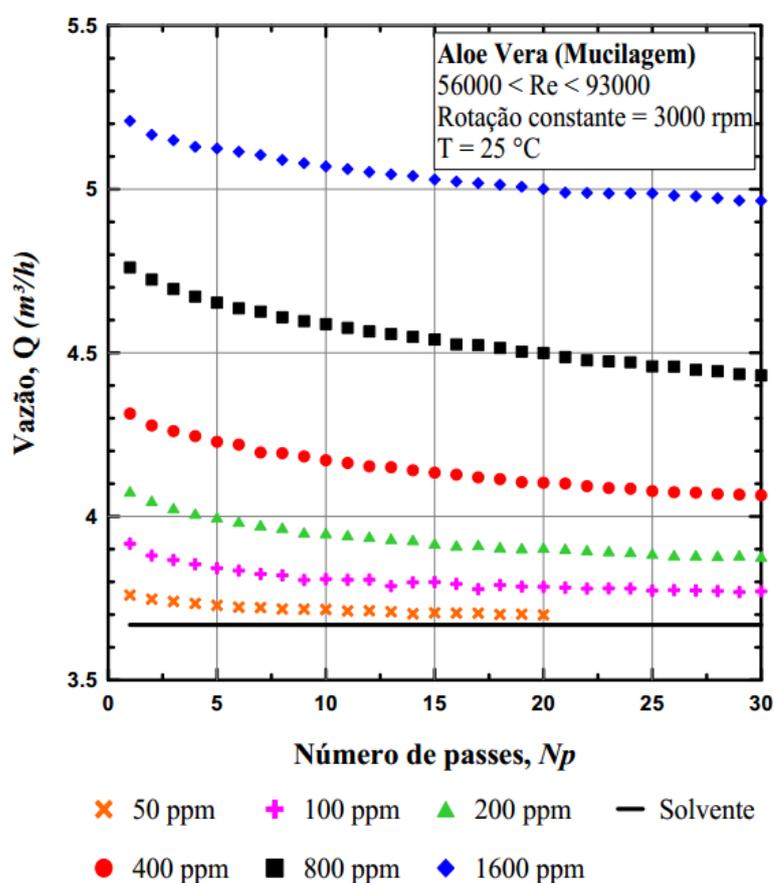


Figura 3.9 - Vazão em função do número de passes para diferentes concentrações

Agora, analisando apenas o comportamento da pressão (Figura 3.10), verifica-se que há uma diminuição da queda de pressão à medida que a concentração é aumentada. Observa-se também, que para a concentração de 1600 ppm a queda de pressão assume valor quase que constante durante os trinta passes (valor médio de aproximadamente 8600 Pa), apresentando uma variação máxima entre os dados de apenas 500 Pa ($\pm 6\%$). Esse valor médio representa uma diminuição da queda de pressão em aproximadamente 4700 Pa (35%) em relação ao solvente (água filtrada – representada pela linha preta contínua). Em termos práticos, essa queda corresponde à redução na energia de pressão na operação do sistema. Para as outras concentrações, observa-se que a diferença na queda de pressão em função do número de passe também é baixa, apresentando uma variação máxima $((\Delta P_{assint} - \Delta P_{inicial})/\Delta P_{inicial})$ de 9% para a concentração de 800 ppm, mostrando mais uma vez boa resistência da mucilagem de aloe vera.

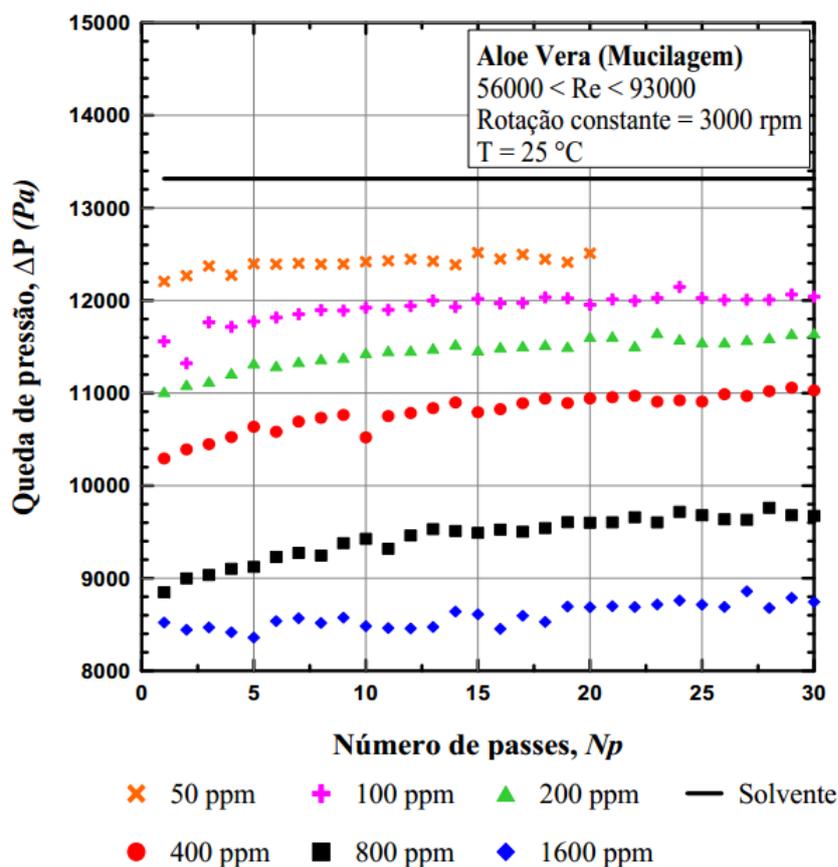


Figura 3.10 - Queda de pressão em função do número de passes para diferentes concentrações.

Como observado nas Figuras 3.9 e 3.10, a mucilagem de aloe vera proporciona um ganho na vazão e uma diminuição da queda de pressão quando comparados ao solvente. Dessa forma, os resultados de redução de arrasto apresentados na Figura 3.7 representam a junção desses dois efeitos. Ainda de acordo com as Figuras 3.9 e 3.10, verifica-se que as diferenças de vazão e queda de pressão entre a solução polimérica e o solvente aumentam com o aumento da concentração e diminuem com o transcorrer do teste, tais comportamentos já eram esperados. A diminuição dessas diferenças com o número de passes está relacionada ao mecanismo de desagregação das moléculas em cada passe, que nesse caso afeta a vazão, pressão e consequentemente o fator de atrito durante o escoamento, como reportado por Pereira, Andrade e Soares (2013), Andrade, Pereira e Soares (2014 e 2016), Soares e Sandoval (2015) e Sandoval e Soares (2016).

3.3 Redução de arrasto relativa

Nesta seção, os resultados de redução de arrasto apresentados na Figura 3.7 são agora exibidos em termos de redução de arrasto relativa (DR'), cujo objetivo é analisar a perda de eficiência da mucilagem de aloe vera para cada concentração. A análise é baseada na razão entre os valores de redução de arrasto obtidos em cada passe pela máxima redução de arrasto (ocorrida no primeiro passe), como descrito na Equação 3. Logo, para todas as concentrações, os resultados de redução de arrasto relativa partem de $DR'_{m\acute{a}x} = 1$ variando até DR'_{assint} . Assim, a diferença entre eles ($DR'_{m\acute{a}x} - DR'_{assint}$) indica a máxima perda de eficiência em redução de arrasto causado pela desagregação dos polímeros presentes na mucilagem de aloe vera devido ao escoamento e ação da bomba. Os resultados de DR' são ilustrados na Figura 3.11.

Na Figura 3.11, pode-se observar que o aumento da concentração causa uma menor desagregação, ou seja, maior eficiência dos polímeros presentes na mucilagem de aloe vera. Porém, comparando os resultados de DR' para as concentrações de 50 e 100 ppm, verifica-se que são muito semelhantes. Esse comportamento também foi observado no trabalho de Pereira, Andrade e Soares (2013). Os autores verificaram que para concentração menor ou igual a 5 ppm a solução de XG não desagrega, para $10 \leq c < 37,5$ ppm a desagregação aumenta com o incremento da concentração, já

a partir de 37,5 ppm, a desagregação começa a diminuir com o aumento da concentração. Ou seja, para polímeros rígidos, quando a concentração é muito baixa, o aumento dessa concentração implica em uma diminuição do DR' e para altas concentrações o comportamento é o contrário. Isso mostra uma complexa relação entre a desagregação e variação da concentração de polímeros rígidos. As soluções de aloe vera estudadas neste trabalho muda de comportamento próximo das concentrações de 50 e 100 ppm.

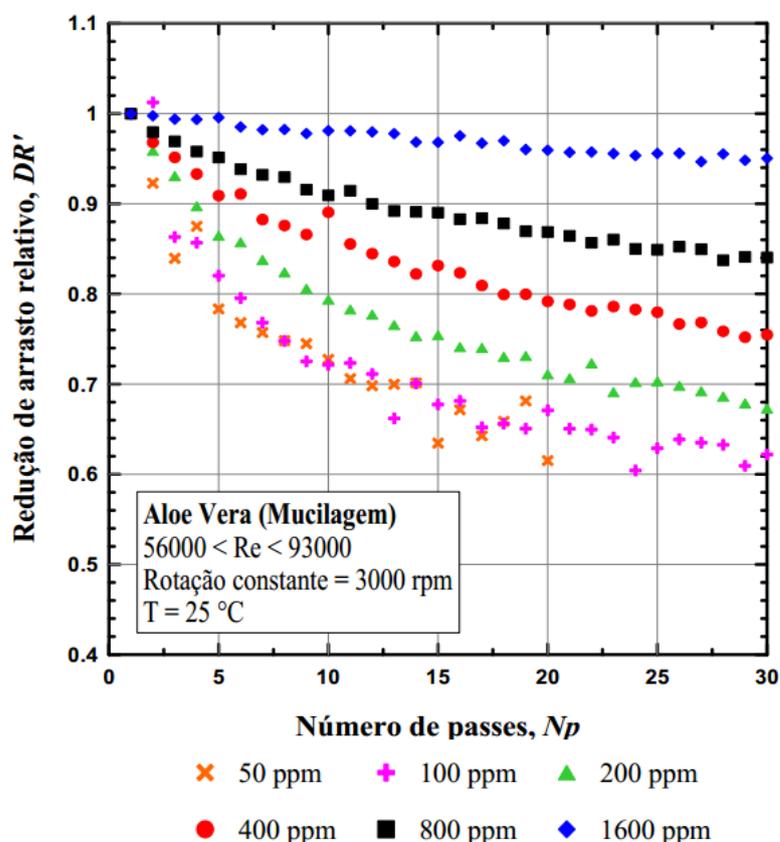


Figura 3.11 - Análise de desagregação dos polímeros nas soluções de aloe vera.

Ainda de acordo com a Figura 3.11, observa-se que a perda de eficiência em termos de redução de arrasto foi no máximo 30%, que corresponde as concentrações de 50 e 100 ppm. Já para a concentração mais elevada (1600 ppm), verifica-se que essa perda de eficiência corresponde a apenas 6%, pois em altas concentrações a desagregação é lenta devido ao maior número de moléculas na solução. Isso mostra mais uma vez a alta resistência e baixa perda de eficiência dos polímeros presentes na mucilagem de aloe vera.

3.4 Efeitos da degradação biológica

Apesar dos polímeros naturais apresentarem alta resistência mecânica e baixa perda de eficiência, deve-se atentar para outro aspecto que esse tipo de material está sujeito, que é a degradação biológica. Sendo assim, foram realizados testes com o objetivo de analisar essa degradação biológica na capacidade de redução de arrasto. Para esses testes foi utilizada a mesma solução (de 1600 ppm) em diferentes períodos de estocagem (1 a 5 dias), conforme descrito na subseção 2.3.2. Os resultados desses experimentos são apresentados na Figura 3.12.

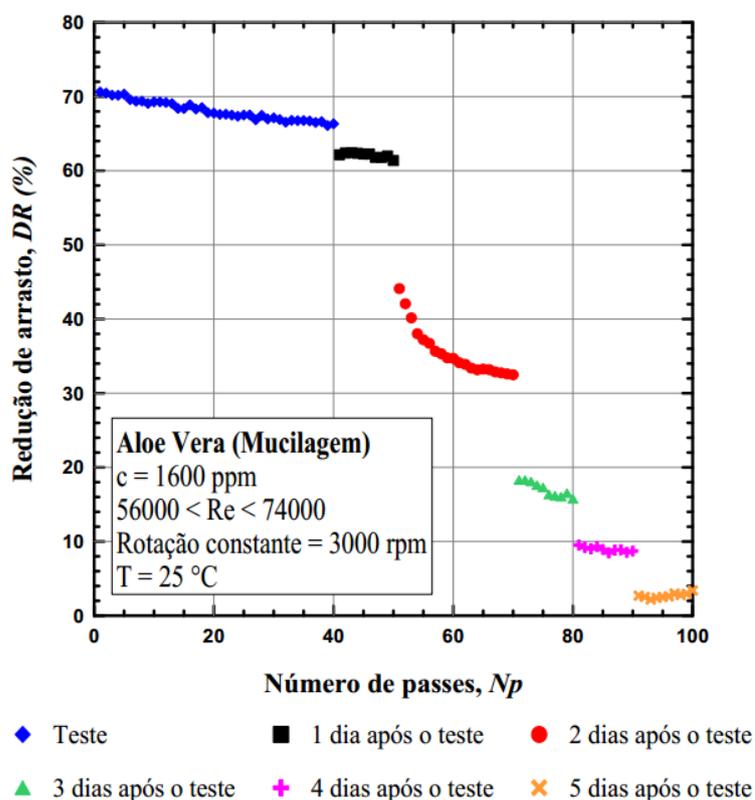


Figura 3.12 – Efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto.

A partir da Figura 3.12, é possível observar claramente o efeito da degradação biológica na capacidade de redução de arrasto, onde variações significativas do percentual de redução de arrasto são observadas entre diferentes períodos de estocagem. O mesmo efeito é observado no estudo de Coelho *et al.* (2016), no qual foi feita uma análise de degradação biológica para o pó extraído do quiabo. Após um dia da realização do teste houve uma queda no valor absoluto de DR igual a 4%, quando comparado ao valor assintótico do dia anterior. Esse comportamento também

é observado nos períodos seguintes de estocagem, atingindo variações no valor absoluto de DR , em relação ao valor assintótico anterior, de 17, 14, 6 e 6% para o segundo, terceiro, quarto e quinto dia após o teste, respectivamente.

Ainda de acordo com a Figura 3.12, observa-se que o resultado do segundo dia de estocagem apresenta comportamento diferente dos demais, onde é possível verificar uma queda significativa de redução de arrasto (variação de quase 12% de DR absoluto) para o teste desse dia. Além disso, foi necessária uma quantidade maior de número de passes para atingir o valor assintótico. Já no quinto dia a solução encontra-se completamente comprometida, apresentando valores de redução de arrasto próximos a zero.

Visando diminuir o efeito da degradação biológica dos polímeros naturais, o uso de bactericidas pode ser uma solução. Porém, se a solução for utilizada em processos que ocorrem em menos de 24 horas, o efeito de degradação biológica não será um fator impactante nos resultados e dispensa o uso de bactericidas.

3.5 Comparação entre diferentes agentes redutores de arrasto.

Nesta seção, são feitas algumas comparações da capacidade de redução de arrasto da mucilagem extraída da planta aloe vera com alguns polímeros naturais, como o pó da casca de aloe vera, o pó do quiabo e a Goma Xantana além da comparação com o polímero sintético Óxido de Polietileno (PEO), que é utilizado para análises de sinergia na próxima seção deste trabalho. Os testes para todos os materiais seguem o mesmo procedimento. Só há uma diferença na etapa de preparo da solução, pois as soluções de PEO necessitam de um período maior (72 horas) para a completa diluição do polímero e ficam condicionadas a uma temperatura de 20°C, procedimento semelhante ao utilizado por Soares *et al.* (2015) e Sandoval e Soares (2016).

Como mencionado, durante o processo de extração da mucilagem de aloe vera, a casca, que seria descartada, passa por diversas etapas de processamento (de acordo com a subseção 2.2.2) e gera um subproduto que é o pó dessa casca, também utilizado como novo agente redutor de arrasto neste trabalho. Logo, são realizados

testes para analisar o efeito da concentração desse material no fenômeno de redução de arrasto em quatro concentrações diferentes (200, 400, 800 e 1600 ppm). Esses resultados são comparados aos obtidos pela mucilagem com as mesmas concentrações, como pode ser observado na Figura 3.13.

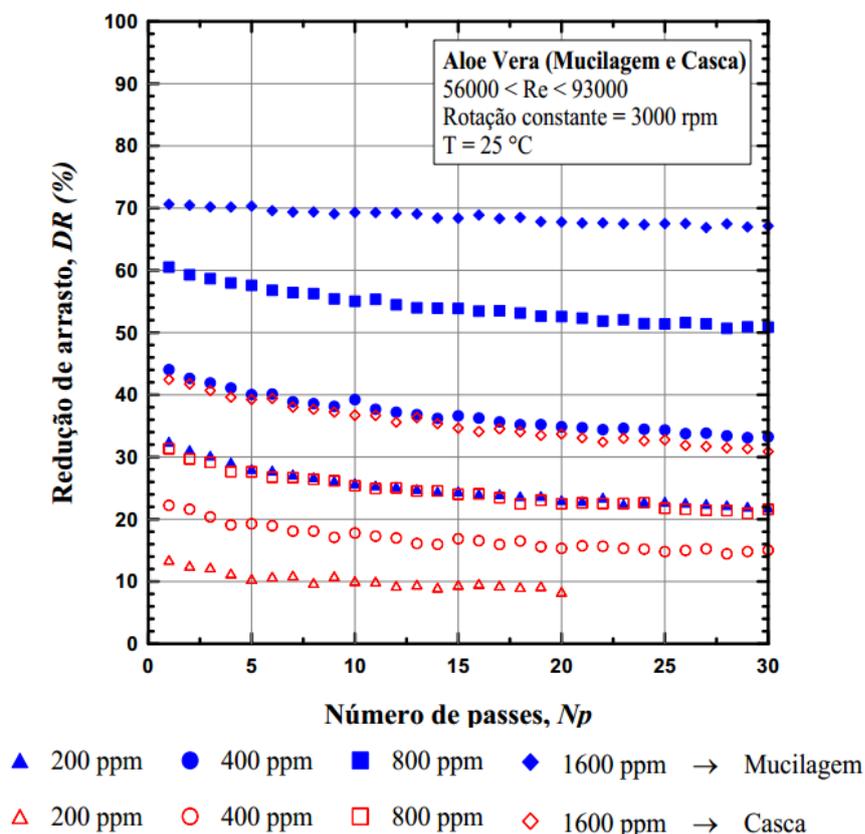


Figura 3.13 - Comparação entre mucilagem e pó da casca de aloe vera em relação à capacidade de redução de arrasto.

A partir da Figura 3.13, observa-se que o comportamento em termos de redução de arrasto do pó da casca por número de passes é muito semelhante aos já observados para a mucilagem, onde o aumento da concentração proporciona maiores valores de redução de arrasto e a variação entre o valor máximo e assintótico de redução de arrasto é baixa, ou seja, baixa desagregação. Já em termos de comparação da capacidade de redução de arrasto com a mucilagem, verifica-se que os resultados para as concentrações de 800 e 1600 ppm do pó da casca equivalem aos obtidos para as concentrações de 200 e 400 ppm da mucilagem, respectivamente. Dessa forma, para essas concentrações, a mucilagem apresenta uma relação de eficiência quatro vezes maior que o pó da casca. Porém, vale lembrar que a casca de aloe vera seria descartada e seu pó apresentou 42% de máxima redução de arrasto e

aproximadamente 30% de redução de arrasto assintótica, indicando baixa perda de eficiência (12% de queda no DR absoluto), para a concentração de 1600 ppm em 30 passes.

Na sequência, os resultados de redução de arrasto obtidos para a mucilagem de aloe vera são agora comparados aos do pó de quiabo, que foram obtidos por Coelho *et al.* (2016). Os autores utilizaram a mesma bancada experimental e a mesma rotação na bomba para realizar seus testes. A Figura 3.14 apresenta os resultados de redução de arrasto por número de passes de ambos os materiais nas concentrações de 100, 200, 400, 800 e 1600 ppm.

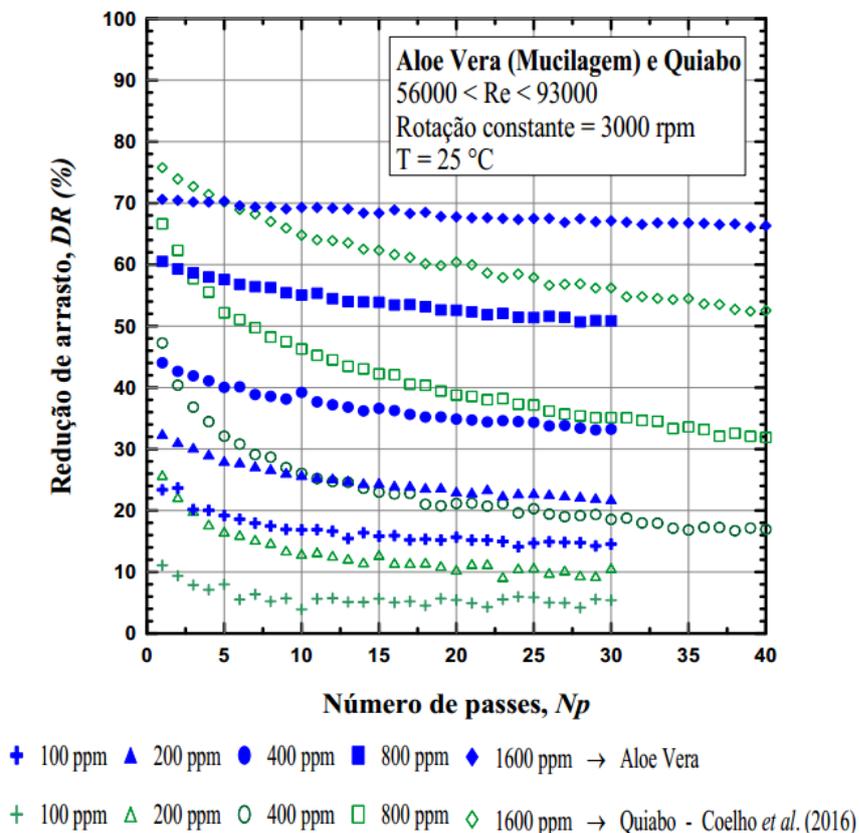


Figura 3.14 - Comparação entre mucilagem e pó de quiabo em relação à capacidade de redução de arrasto.

Analisando os resultados apresentados na Figura 3.14, é possível observar que para a mesma concentração, a maioria dos resultados obtidos com a mucilagem de aloe vera são superiores aos do pó de quiabo. Percebe-se ainda que, para as concentrações de 100 e 200 ppm, o valor de $DR_{máx}$ da mucilagem de aloe vera é superior ao apresentado pelo pó de quiabo. Essa diferença diminui à medida que a

concentração é incrementada e, a partir da concentração de 400 ppm, o valor de $DR_{máx}$ do pó de quiabo passa a ser maior que o obtido pela mucilagem de aloe vera. Por mais que o valor de $DR_{máx}$ do pó de quiabo seja superior em concentrações mais elevadas, a partir de um certo número de passe o valor de redução de arrasto da mucilagem de aloe vera volta a ficar maior, isso ocorre no passe 2, 3 e 5 para as concentrações de 400, 800 e 1600 ppm, respectivamente, e permanece superior até atingir o valor assintótico. O valor de DR_{assint} para a mucilagem de aloe vera permanece superior ao do pó de quiabo em todas as concentrações. Outra observação importante nessa figura diz respeito a perda de eficiência do material. Percebe-se que tal perda é muito menor para a mucilagem de aloe vera do que para o pó de quiabo. Para a concentração de 1600 ppm ocorre queda percentual $((DR_{máx} - DR_{assint})/DR_{máx})$ de 6% e 31% para a mucilagem de aloe vera e pó de quiabo, respectivamente, indicando que a mucilagem de aloe vera é menos sensível ao mecanismo de desagregação do que o pó de quiabo, ou seja, mais resistente as tensões cisalhantes devido ao escoamento e ação da bomba.

Na sequência é feita uma comparação entre os resultados de redução de arrasto da mucilagem de aloe vera com os do pó de quiabo e Goma Xantana obtidos por Coelho *et al.* (2016). Essa comparação pode ser observada na Figura 3.15, onde os resultados de redução de arrasto são apresentados em função do número de passes. Verifica-se nessa figura, que os três materiais apresentam comportamentos semelhantes em termos de desagregação com o transcorrer do teste, isso ocorre pelo fato de que todos os materiais são considerados rígidos e apresentam alta resistência. Ainda é possível observar que para as concentrações de 100 e 200 ppm, os valores de redução de arrasto apresentados pela XG são superiores aos demais materiais, comparando-as a mesma concentração. Os resultados de 200 ppm de XG são ainda superiores aos de 400 ppm de mucilagem de aloe vera e do pó de quiabo. Em termos de eficiência na redução de arrasto, os valores de DR para a solução de XG a concentração de 100 ppm estão bem próximos aos valores de 200 ppm de mucilagem de aloe vera e 400 ppm de pó de quiabo, o que pode apresentar uma relação de eficiência entre a XG e a mucilagem de aloe vera de pelo menos duas vezes e em relação ao pó de quiabo de quatro vezes. Dessa forma, conclui-se que para a mesma concentração, a XG apresenta melhores resultados em termos de redução de arrasto, seguida da mucilagem de aloe vera e, não menos importante, o pó de quiabo. Porém,

vale ressaltar que, apesar de apresentarem resultados de redução de arrasto inferiores à XG, a obtenção da mucilagem de aloe vera e do pó de quiabo apresenta um custo muito menor que a XG e a matéria prima é encontrada em diversas regiões.

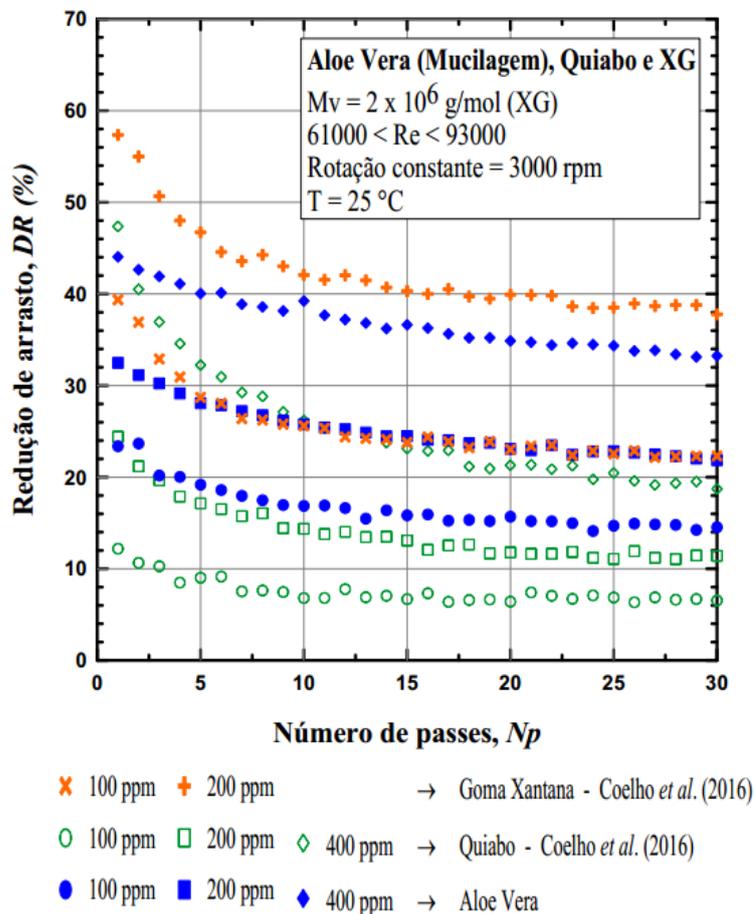


Figura 3.15 - Comparação entre mucilagem, pó de quiabo e Goma Xantana em relação à capacidade de redução de arrasto.

A última comparação entre os materiais redutores de arrasto apresentados neste trabalho é entre a mucilagem de aloe vera e o PEO de massa molecular igual 5×10^6 g/mol. A Figura 3.16 apresenta os resultados de redução de arrasto por número de passes nas concentrações de 200 e 400 ppm.

Pode ser observado na Figura 3.16 que o PEO apresenta maior capacidade de redução de arrasto nos passes iniciais em comparação com a mucilagem de aloe vera. Porém, após alguns passes ocorre o contrário (4º e 11º passe para 200 e 400 ppm, respectivamente). Isso acontece devido aos diferentes comportamentos de material rígido (mucilagem de aloe vera) e flexível (PEO). Como mencionado diversas vezes neste trabalho, a mucilagem de aloe vera, por se tratar de um material rígido, mantém

um patamar elevado de redução de arrasto durante seu transporte. PEO, que é um polímero flexível, apresenta alta capacidade de redução inicial, porém, sua eficiência é afetada pela degradação polimérica e atinge valor muito inferior ao apresentado inicialmente para a mesma concentração, quando comparado com materiais naturais. Para a concentração de 200 ppm, a diferença percentual $((DR_{m\acute{a}x} - DR_{assint})/DR_{m\acute{a}x})$ para a mucilagem de aloe vera e PEO atinge 33% e 85%, respectivamente. Esses valores indicam quanto cada material perde em eficiência devido as tensões de cisalhamento do escoamento e da bomba centrífuga. Já para concentração de 400 ppm essa diferença percentual é de 26% e 77% para a mucilagem de aloe vera e o PEO, respectivamente. Isso mostra que a desagregação (para materiais rígidos) ou a degradação (para materiais flexíveis) é menor à medida que a concentração do material na solução é aumentada.

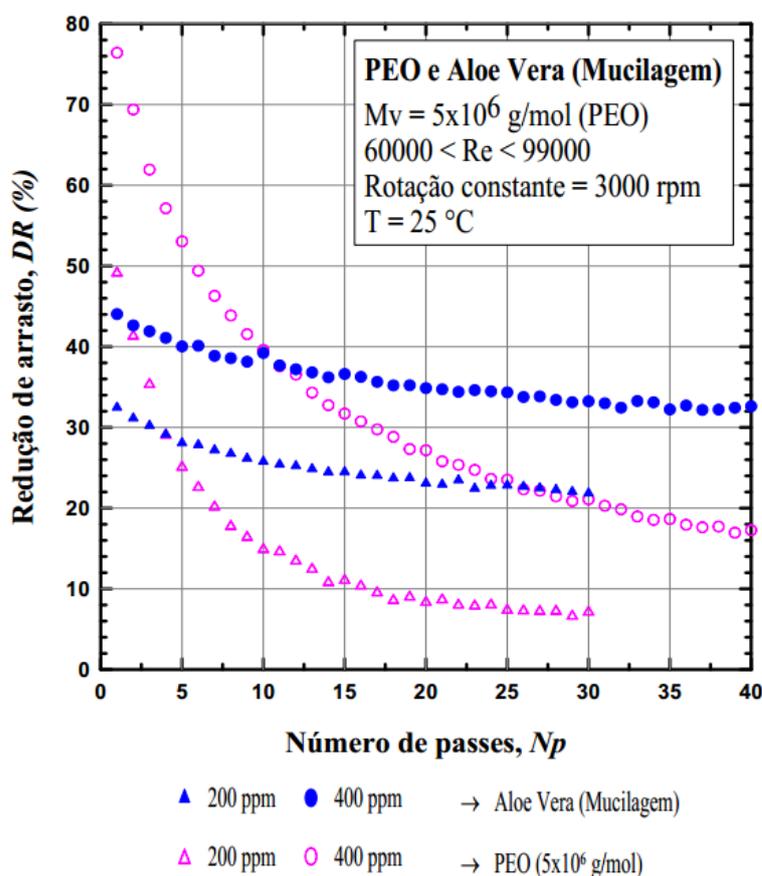


Figura 3.16 - Comparação entre mucilagem e Óxido de Polietileno (PEO) em relação à capacidade de redução de arrasto.

Ainda de acordo com a Figura 3.16, verifica-se também que a partir do passe 25 os valores de redução de arrasto para 200 ppm de mucilagem de aloe vera passam a

serem iguais ou maiores do que os resultados de 400 ppm de PEO. Dessa forma, para escoamento sujeito a altas tensões de cisalhamento e por um longo período é preferível a utilização da mucilagem de aloe vera (material rígido) do que o PEO (material flexível) para reduzir arrasto.

3.6 Redução de arrasto com mistura de materiais

Nesta seção são feitas análises de redução de arrasto a partir de misturas de materiais redutores de arrasto. Os materiais utilizados nessas análises são: a mucilagem e o pó da casca de aloe vera e o PEO. Os testes seguem o mesmo procedimento dos demais, mas agora a solução é uma mistura entre os materiais. Essa análise tem o objetivo de verificar se há sinergia entre esses materiais, aspecto que já foi relatado por Lee, Vaseleski e Metzner (1974), Dingilian e Ruckenstein (1974), Dschagarowa e Bochossian (1978), Reddy e Singh (1985) e Sandoval e Soares (2016).

Os testes são feitos com concentração de 400 ppm (200 ppm de cada material) e o resultado obtido a partir da mistura é apresentado juntamente aos dados já mostrados anteriormente, com concentrações de 200 e 400 ppm para cada material.

Assim, a primeira análise é feita para a mistura dos materiais obtidos a partir da aloe vera, que são a mucilagem e o pó da casca. Os resultados são apresentados na Figura 3.17 juntamente com os resultados dos materiais separadamente. Nessa figura, é possível observar que os resultados apresentados têm comportamentos similares, por se tratarem de materiais rígidos. Além disso, pode-se verificar que a curva da mistura está abaixo da curva de mucilagem para a concentração de 400 ppm. Já a curva que representa a soma dos resultados das soluções de 200 ppm dos materiais individualmente se apresentou acima da curva de mistura, indicando que o efeito sinérgico foi negativo.

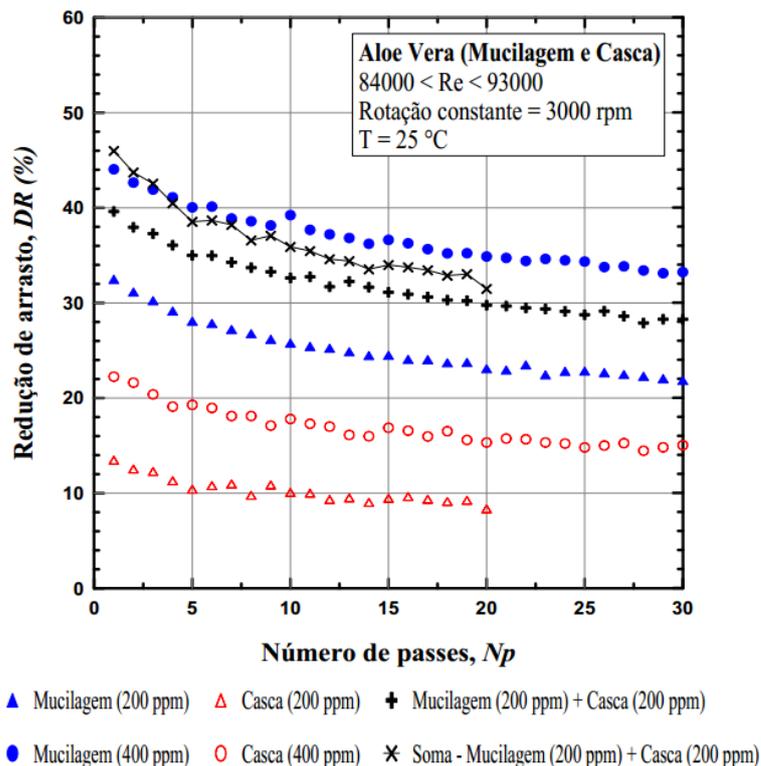


Figura 3.17 - Mistura de mucilagem e pó da casca da folha de aloe vera.

Na Figura 3.18, são apresentados os resultados da mistura entre o pó da casca de aloe vera (rígido) e o PEO (flexível) e de cada material individualmente. Comparando os resultados individuais do PEO e do pó da casca de aloe vera, verifica-se que os resultados com PEO são bem superiores no início e atingem valores assintóticos de redução de arrasto próximos aos obtidos pelo pó da casca. Os resultados do pó da casca de aloe vera apresentam poucas variações em seus valores, esses comportamentos distintos são devidos as características rígidas e flexíveis dos materiais. Observa-se também, que a curva correspondente a mistura apresenta valores abaixo da curva de 400 ppm de PEO. Comparando a curva que corresponde a soma dos resultados das soluções de 200 ppm dos materiais individualmente e a curva de mistura, verifica-se que a soma atinge valores próximos aos da mistura até o terceiro passe e a partir desse passe a curva da mistura passa a apresentar valores superiores, indicando que a sinergia é nula até o terceiro passe e a partir desse momento passa a ser positiva.

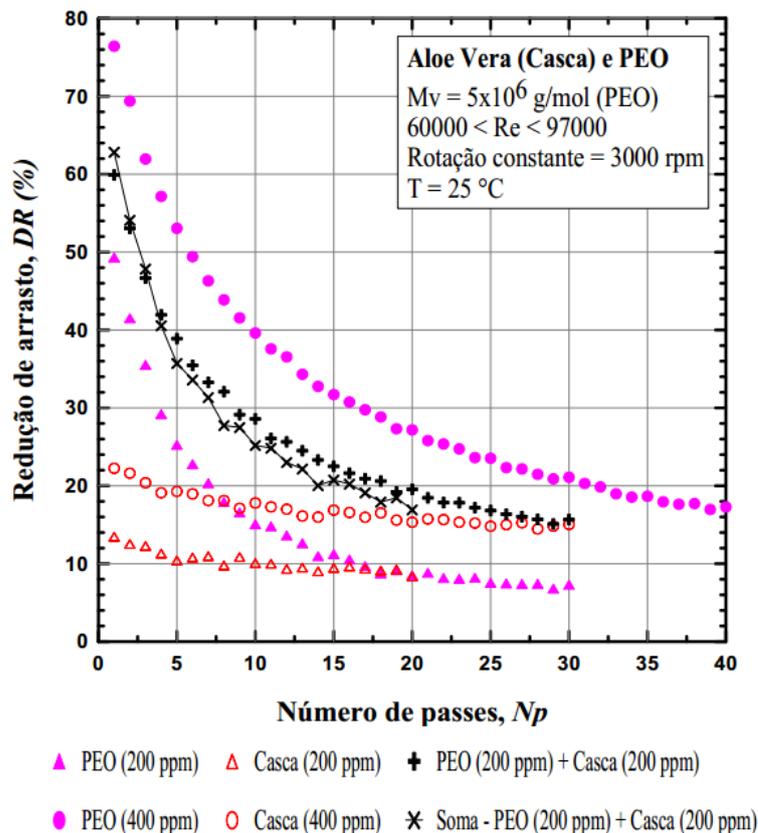


Figura 3.18 - Mistura do pó da casca da folha de aloe vera e PEO.

Por fim, é apresentado na Figura 3.19 os resultados obtidos pela mistura da mucilagem de aloe vera (rígido) e PEO (flexível) e seus respectivos resultados individuais. A comparação individual dos materiais já foi realizada anteriormente na seção 3.5. É possível observar nessa figura que a curva correspondente a mistura apresenta valores de redução de arrasto inferiores aos do PEO (400 ppm) e superiores aos da mucilagem (400 ppm) até o passe 12. A partir desse passe o comportamento se inverte. Analisando agora a curva que corresponde a soma dos resultados das soluções de 200 ppm de cada material, observa-se que essa curva apresenta valores superiores a curva da mistura, indicando uma sinergia negativa, porém essa sinergia tende a ficar nula com o transcorrer do teste.

Ainda é possível verificar na Figura 3.19 que, a curva de mistura atinge valor assintótico superior ao obtido por 400 ppm de PEO (aproximadamente 10% em termos de redução de arrasto absoluta). Sendo assim, no ponto de vista comercial, a mistura (200 ppm de PEO + 200 ppm de mucilagem de aloe vera) pode ser a melhor opção que 200 e 400 ppm de PEO.

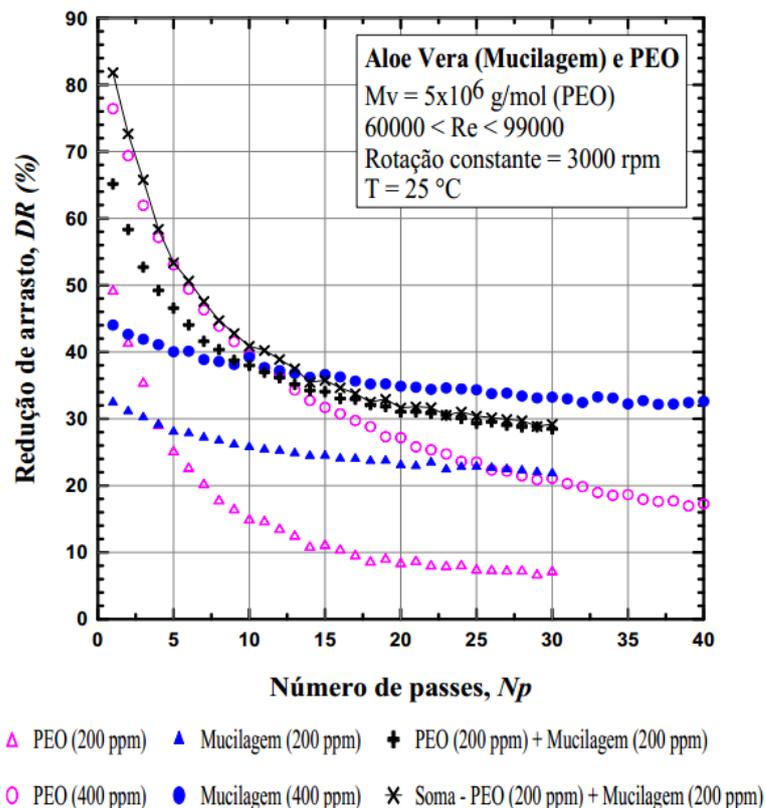


Figura 3.19 - Mistura da mucilagem de aloe vera e PEO.

Para alguns autores o efeito sinérgico está ligado a formação de agregados entre as moléculas, os quais seriam originados pelas forças intermoleculares entre as diferentes soluções poliméricas, fato reportado por Sandoval e Soares (2016) e estudado por Shetty e Solomon (2009) em suas análises para as moléculas de PEO. Já Mohsenipour e Pal (2013) e Steele, Bayer e Loth (2014) apresentam outra ideia, que diz respeito a mudança na acomodação das moléculas quando estão juntas no mesmo solvente, fazendo com que as moléculas flexíveis fiquem mais estendidas. Sendo assim, a partir dessas duas ideias apresentadas, a melhoria nos resultados a partir da mistura de materiais redutores de arrasto está associada com o aumento do comprimento médio das moléculas em solução.

A partir das análises de misturas apresentadas neste trabalho, verifica-se que o efeito sinérgico é mais evidente quando se mistura um material rígido com um flexível (neste caso o PEO). Os resultados obtidos pela mistura desses diferentes materiais apresentam uma combinação das melhores características de cada, que é uma boa capacidade em reduzir arrasto (relaciona ao material flexível – PEO) e alta resistência

ao escoamento e ação da bomba (relacionado aos materiais rígidos – mucilagem e pó da casca de aloe vera), aspecto que já foi reportado por Sandoval e Soares (2016).

CAPÍTULO 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho mostra uma análise experimental da redução de arrasto em escoamento turbulento em dutos a partir da adição da mucilagem e/ou fibras de aloe vera. Faz-se também uma análise de misturas entre diferentes materiais (naturais ou sintéticos) em relação à capacidade em reduzir arrasto. Para a obtenção desses novos DRA naturais, foi preciso desenvolver metodologias para processar as folhas de aloe vera até chegar aos produtos finais a serem testados, uma vez que os mesmos não são encontrados comercialmente.

Os resultados preliminares com a mucilagem de aloe vera mostraram-se bastante satisfatórios. Porém, plantas de diferentes regiões não produzem mucilagem com as mesmas características. Isso torna difícil a garantia de alguns parâmetros importantes na redução de arrasto, como a concentração e massa molecular dos polímeros presentes na mucilagem.

Já para os testes principais os valores de *DR* aumentam com o incremento da concentração. Para a concentração de 1600 ppm o máximo valor de *DR* foi de aproximadamente 71%, que é apenas 10% menor que a MDR. Analisando cada concentração, observou-se que os valores de *DR* não variam consideravelmente com o número de passes, indicando baixa perda de eficiência.

Por se tratar de um material natural, foram feitos testes para verificar a degradação biológica da mucilagem de aloe vera com concentração de 1600 ppm. A partir desses testes, verificou-se que no quinto dia a solução de mucilagem se encontrava completamente degradada biologicamente e apresentava valores de *DR* próximos a zero.

Foram feitas análises comparativas entre a mucilagem de aloe vera e diferentes DRA (natural e sintético). Primeiramente, a mucilagem é comparada com a casca de aloe vera em forma de pó. A análise mostrou que a mucilagem tem eficiência quatro vezes

maior que a casca, porém vale ressaltar que a casca é abundante, fácil de obter e proporciona uma redução de arrasto máxima de 42% para a concentração de 1600 ppm. Comparando a mucilagem com mais dois materiais naturais, a Goma Xantana e a mistura de polímero e fibra de quiabo, que foram estudados por Coelho *et al.* (2016), verificou-se comportamentos similares para os três materiais naturais. Para a mesma concentração, os valores obtidos para a mucilagem de aloe vera representam aproximadamente a metade dos alcançados pela Goma Xantana e aproximadamente o dobro dos obtidos pela mistura de mucilagem e fibra de quiabo. A mucilagem ainda foi comparada com o polímero flexível PEO e os resultados mostram comportamentos distintos, devido as diferentes características dos materiais. Dessa forma, para a mesma concentração, verificou-se que os valores de PEO são superiores aos da mucilagem no início do teste e esse comportamento se inverte a partir de um certo número de passe.

Ainda foram feitos diversos testes misturando-se PEO, mucilagem e casca de aloe vera para verificar possíveis efeitos sinérgicos entre eles. De fato, resultados sinérgicos entre os materiais foram observados, onde essa sinergia é menor quando se mistura dois materiais rígidos. Já para a mistura de materiais rígido e flexível a sinergia geralmente é menor no início do teste e tende a aumentar com o transcorrer do teste. Dessa forma, verificou-se que o efeito sinérgico é mais evidente quando se mistura um material rígido com um flexível, como já observado por outros autores.

A aloe vera apresenta algumas vantagens em relação a outro natural (a XG por exemplo), como o baixo custo, simples aquisição, ser extraído de planta e matéria prima abundante. Com relação aos sintéticos, as vantagens são: a alta resistência, baixo custo, mais biodegradável e ser uma matéria prima abundante no Brasil. Ainda seu processamento não é tão complexo e é atóxico. Por ser natural e não possuir toxicidade, o mesmo pode ser utilizado em aplicações que envolva o meio ambiente e até mesmo estudos na área da medicina.

Apesar de resultados satisfatórios, a mucilagem de aloe vera como DRA ainda precisa ser mais estudada. Como trabalho futuro, sugere-se investigar novas metodologias para extrair e armazenar a mucilagem além de realizar uma caracterização física, química e reológica para se conhecer melhor as características desse material e

investigar a utilização de bactericida para que a solução leve um tempo maior para se degradar biologicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abdulbari, H. A., Ahmad M. A. e Yunus R. B. M. "Formulation of okra-natural mucilage as drag reducing agent in different size of galvanized Iron pipes in turbulent water flowing system", *Journal of Applied Sciences*, vol. 10, pp. 3105-3110, 2010.
- [2] Abdulbari, H. A., Kamarulizam, N. S. e Nour, A. H. "Grafted natural polymer as new drag reducing agent: An experimental approach", *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 18, pp. 361-371, 2012.
- [3] Abdulbari, H. A., Letchmanam, K. e Yunus, R. M.. "Drag reduction characteristics using Aloe Vera natural mucilage: an experimental study", *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, pp. 1039-1043, 2011.
- [4] Abdulbari, H. A., Shabirin, A. e Abdurrahman, H. N. "Bio-polymers for improving liquid flow in pipelines - A review and future work opportunities", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 20, pp. 1157-1170, 2014.
- [5] Andrade, R. M., Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Drag increase at the very start of drag reducing flows in a rotating cylindrical double gap device", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 212, pp. 73-79, 2014.
- [6] Andrade, R. M., Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Drag reduction in synthetic seawater by flexible and rigid polymer addition into a rotating cylindrical double gap device", *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 138, pp. 021101-1-021101-10, 2016.
- [7] Batista, A. V. S., Porto, E. A. e Molina, G. P. "Estudo da anatomia da artéria coronária esquerda e suas variações: perspectivas de nova classificação", *Revista de Saúde & Ciência*, vol. 2, pp. 55-65, 2011.
- [8] Bewersdorff, H. W. e Berman, N. S. "The influence of flow-induced non-Newtonian fluid properties on turbulent drag reduction", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 130-136, 1988.
- [9] Bewersdorff, H. W. e Singh, R. P. "Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions", *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 617-627, 1988.

- [10] Burger, E. D. e Chorn, L. G. "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing prudhoe bay crude oil", *Journal of Rheology*, vol. 24, pp. 603-626, 1980.
- [11] Chen, X., Zha, D. Xiu, J., Liao, Y., Cui, K., Lin, H., Jian, Z., Hu, F., Huang, X., Zhou, B. e Huang, Q. "A new hydrodynamic approach by infusion of drag-reducing polymers to improve left ventricular function in rats with myocardial infarction", *International Journal of Cardiology*, vol. 147, pp. 112-117, 2011.
- [12] Choi, H. J. e Jhon, M. S. "Polymer-induced turbulent drag reduction," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 35, pp. 2993–2998, 1996.
- [13] Choi, H. J. Kim, C. A. Sohn, J. e Jhon, M. S. "An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 69, pp. 341–346, 2000.
- [14] Chow, J.T., Williamson, D.A., Yates, K. M., Goux, W.J. "Chemical characterization of the immunomodulating polysaccharide of Aloe Vera L.", *Carbohydrate Research*, vol. 340, pp. 1131-1142, 2005.
- [15] Coelho, E. C, Barbosa, K. C. O., Soares, E. J., Siqueira, R, N. e Freitas, J. C. C. "Okra as a drag reducer for high Reynolds numbers water flows", *Rheologica Acta*, vol. 55, pp. 983-991, 2016.
- [16] Dingilian, E. e Ruckenstein, E. "Positive and negative deviations from additivity in drag reduction of binary dilute polymer solutions", *AIChE Journal*, Vol. 20, pp. 1222-1224, 1974.
- [17] Dschagarowa, E. e Bochossian T. "Drag reduction in polymer mixtures", *Rheologica Acta*, vol. 17, pp. 426-432, 1978.
- [18] Dubief, Y., White, C. M., Terrapon, V. E., Shaqfeh, E. S. G., Moin, P. e Lele, K. "On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 514, pp. 271-280, 2004.
- [19] Dujmovich, T. e Gallegos, A. "Drag reducers improve throughput, cut costs," *Offshore*, vol. 65, no. 12, pp. 1–4, 2005.
- [20] Elbing, B. R. Winkel, M. J. Solomon, M. J. e Ceccio, S. L. "Degradation of homogeneous polymer solutions in high shear turbulent pipe flow," *Exp Fluids*, vol. 47, pp. 1033–1044, 2009.

- [21] Fabula, G. "Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction", *Trans ASME Journal of Basic Engineering*, vol.93, pp. 453-455, 1971.
- [22] Figueredo, R. C. R. e Sabadini, E. "Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide", *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, pp. 77-86, 2003.
- [23] Forrest, F. e Grierson, G. A. "Friction losses in cast iron pipe carrying paper stock", *Paper Trade Journal*, vol. 92, no. 22, pp. 39-41, 1931.
- [24] Gasljevic, K., Aguilar, G. e 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.
- [25] Gasljevic, K., Hall, K., Chapman, D. e Matthys, E. F. "Drag-reducing polysaccharides from marine microalgae: species productivity and drag reduction effectiveness", *Journal of Applied Phycology*, vol. 20, pp. 299-310, 2008.
- [26] Jaafar, A. e Poole, R.J. "Drag reduction of biopolymer flows", *Journal of Applied Sciences*, vol. 11, pp. 1544-1551, 2011.
- [27] Joseph, D. D. "Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids", New York: Springer Verlag, vol. 84, 1990.
- [28] Kameneva, M. V., Wu, Z. J., Uraysh, A., Repko, B., Litwak, K .N., Billiar, T. R., Fink, M. P. e Simmons, R. L. "Blood soluble drag-reducing polymers prevent lethality from hemorrhagic shock in acute animal experiments", *Biorheology*, vol. 41, pp. 53-64, 2004.
- [29] Kameneva, M. V. "Microrheological effects of drag-reducing polymers in vitro and in vivo", *International Journal of Engineering Science*, vol. 59, 168-183, 2012.
- [30] Kenis, P. R. "Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 15, p. 607-618, 1971.
- [31] L'vov, V. S., Pomyalov, A., Procaccia, I. e Tiberkevich, V. "Drag reduction by polymers in wall bounded turbulence", *Physical Review Letters*, vol. 92, pp. 244503-1-244503-4, 2004.
- [32] 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.

- [33] Lee, W. K., Vaseleski, R. C. e Metzner, A. B. "Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers", *AIChE Journal*, vol. 20, pp. 128-133, 1974.
- [34] Lumley, J. L. "Drag reduction by additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 11, pp. 367-384, 1969.
- [35] Lumley, J. L. "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives", *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, vol. 7, pp. 263-290, 1973.
- [36] Macias, C. A., Kameneva, M. V., Tenhunen, J. J., Puyana, J. C. e Fink, M. P. "Survival in a rat model of lethal hemorrhagic shock is prolonged following resuscitation with a small volume of a solution containing a drag-reducing polymer derived from aloe vera", *Shock*, vol. 22, pp. 151-156, 2004.
- [37] Marhefka, J. N. e Kameneva, M. V. "Natural drag-reducing polymers: discovery characterization and potential clinical applications", *MDPI Open Access Journals Platform*, vol. 1 pp. 6, 2016.
- [38] Merrill, E. W. e Horn, A. F. "Scission of macromolecules in dilute solution: Extensional and turbulent flows", *Polymer Communications*, vol. 25, pp. 144-146, 1984.
- [39] Min, T. Yoo, J. Y., Choi, H. e Joseph, D. D. "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 486, pp. 213-238, 2004.
- [40] Mohsenipour, A. A. e Pal, R. "The role of surfactants in mechanical degradation of drag-reducing polymers", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, pp. 1291-1302, 2013.
- [41] Morris, E. R. "Molecular Origin of Xanthan Solution Properties", *Extracellular Microbial Polysaccharides*, ACS Symposium Series, Chapter 6, vol. 45, pp. 81-89, 1977.
- [42] Mostardi, R. A. Thomas, L. C., Greene, H. L., VanEssen, F. e Nokes, R. F. "Suppression of atherosclerosis in rabbits using drag reducing polymers", *Biorheology*, vol. 15, pp. 1-14, 1978.
- [43] Moussa, T. e Tiu, C. "Factors affecting polymer degradation in turbulent pipe flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681-1692, 1994.

- [44] Muller, G., Anrhourache, M., Lecourtier, J., e Chauveteau, G. "Salt dependence of the conformation of a single-stranded xanthan", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 8, pp. 167-172, 1986.
- [45] Mysels, K. J. "Flow of thickened fluid," US Patent 2 492, 173, December 27, 1949.
- [46] Nakken, T., Tande, M. and Elgsaeter, A. "Measurements of polymer induced drag reduction and polymer scission in Taylor flow using standard double-gap sample holders with axial symmetry," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 97, pp. 1-12, 2001.
- [47] Nijs, L. "New generation drag reducer," in *Proceedings of the 2nd International Pipeline Technology Conference*, Elsevier, Ostend, Belgium, 1995.
- [48] Odell, J. A., Keller, A. e Miles, M. J. "A Method for Studying Flow Induced Polymer Degradations - Verification of Chain Halving", *Polymer Communication.*, vol. 24, pp. 7-10, 1983.
- [49] Ogata, S. e Warashina, J. "Drag Reduction of a Pipe Flow Using Nata de Coco Suspensions", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 651260-1-651260-8, 2014.
- [50] Paterson, R. W. e Abernathy, F. H. "Turbulent flow drag reduction and degradation with dilute polymer solutions", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 43, 689-710, 1970.
- [51] Pereira, A. S. e Soares, E. J. "Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 179, pp. 9-22, 2012.
- [52] Pereira, A. S., Andrade, R. M. e Soares, E. J. "Drag reduction induced by flexible and rigid molecules in a turbulent flow into a rotating cylindrical double gap device: Comparison between Poly (ethylene oxide), Polyacrylamide, and Xanthan Gum," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 202, pp. 72-87, 2013.
- [53] Phukan, S., Kumar, P., Panda, J., Nayak, B. R., Tiwari, K. N. e Singh, R. P. "Application of drag reducing commercial and purified guar gum for reduction of energy requirement of sprinkler irrigation and percolation rate of the soil", *Agricultural Water Management*, vol. 47, pp. 101-118, 2001.

- [54] Ptasiniski, P. K., Nieuwstadt, F. T. M., Van den Brule, B. H. A. A., e Hulsen, M. A. "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction", *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 66, pp. 159-182, 2001.
- [55] Reddy, G. V. e Singh R. P. "Drag reduction effectiveness and shear stability of polymer-polymer and polymer-fibre mixtures in recirculatory turbulent flow of water", *Rheologica Acta*, vol. 24, pp. 296-311, 1985.
- [56] Rivers, E. P., McIntyre, L., Morro, D. C. e Rivers, K. K. "Early and innovative interventions for severe sepsis and septic shock: taking advantage of a window of opportunity", *Canadian Medical Association Journal*, vol. 173, pp. 1054-1065. 2005.
- [57] Ryskin, G. "Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory", *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 2059-2062, 1987.
- [58] Sakai, T., Repko, B. M., Griffith, B. P., Waters, J. H. e Kameneva, M. V. "I.V. infusion of a drag-reducing polymer extracted from aloe vera prolonged survival time in a rat model of acute myocardial ischaemia", *British Journal of Anaesthesia*, vol. 98, pp. 23-8, 2007.
- [59] Salehudin, S.S. e Ridha, S. "Coconut residue as biopolymer drag reducer agent in water injection system", *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, pp. 8037-8040, 2016.
- [60] Sandoval, G. A. e Soares, E. J. "Effect of combined polymers on the loss of efficiency caused by mechanical degradation in drag reducing flows through straight tubes", *Rheologica Acta*, vol. 55, pp. 559-569, 2016.
- [61] 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.
- [62] Shetty, A. M. e Solomon, M. J. "Aggregation in dilute solutions of high molar mass poly(ethylene) oxide and its effect on polymer turbulent drag reduction", *Polymer*, vol. 50, pp. 261-270, 2009.
- [63] Singh, R. P., Singh, J., Deshmukh, S. R. e Kumar, A. "The effect of grafted and ungrafted guar gum on turbulent flow of water and on hydraulic conductivity of

- soil”, Proceedings of the IUTAM Symposium on the Influence of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields, pp. 131-139, 1985.
- [64] Singh, H. K. G., Jaafar, A., e Yusup, S. “The Effect of Sodium Hydroxide on Drag Reduction using a Biopolymer”, MATEC Web of Conferences, Vol. 13, pp. 0203-1-0203-5, 2014.
- [65] Soares, E. J., Sandoval, G. A., Silveira, L., Pereira, A. S., Trevelin, R., e Thomaz, F. “Loss of efficiency of polymeric drag reducers induced by high Reynolds number flows in tubes with imposed pressure”, Physics of Fluids, vol. 27, pp. 125105-1-125105-23, 2015.
- [66] Sohn, J. I., Kim, C. A., Choi, H. J. e Jhon, M. S. “Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus”, Carbohydrate Polymers, vol. 45, pp. 61-68, 2001.
- [67] Sreenivasan K. R. e White C. M. “Analysis of polymer drag reduction on a flat plate”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 409, pp. 149-164, 2000.
- [68] Steele, A., Bayer, I. S., e Loth, E. “Pipe flow drag reduction effects from carbon nanotube additives”, Carbon, vol. 77, pp. 1183-1186, 2014.
- [69] Tabor, M. e De Gennes, P. G. “A cascade theory of drag reduction”, Europhysics Letter, vol. 7, pp. 519-522, 1986.
- [70] 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.
- [71] Unthank, J. L. S. G., Lalka, S. G., Nixon, J. C. e Sawchuk, A. P. “Improvement of flow through arterial stenoses by drag reducing agents”, Journal of Surgical Research, vol. 53, pp. 625-630, 1992.
- [72] Vanapalli, S. A., Islam, T. M., e Solomon, J. M. “Universal scaling for polymer chain scission in turbulence”, Physics of Fluids, vol. 17, pp. 1-11, 2005.
- [73] Virk, P. S., Merrill, E. W., Mickley, H. S. e Smith, K. A. “The toms phenomenom: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions”, Journal of Fluid Mechanics, vol. 22, pp. 22-30, 1967.

- [74] Virk, P.S. Sherman, D.C. e Wagger, D.L. Additive equivalence during turbulent drag reduction, *AIChE Journal*, vol. 43, pp. 3257-3259, 1997.
- [75] Virk, P.S. "Drag reduction by collapsed and extended polyelectrolytes", *Nature*, vol. 253, pp. 109-110, 1975.
- [76] Virk, P. S. "Drag reduction fundamentals", *AIChE Journal*, vol. 21, pp. 625-656, 1975.
- [77] Warholic, M. D., Massah, H., e Hanratty, T. J. "Influence of drag-reducing polymers on turbulence: effects of reynolds number, concentration and mixing", *Experiments in Fluids*, vol. 27, pp. 461-472, 1999.
- [78] White, C. M. e Mungal, M. G. "Mechanics and prediction of turbulent drag reduction whit polymer additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 40, pp. 235-256, 2008.
- [79] Wyatt, N. B., Gunther, C. M. e Liberatore, M. W. "Drag reduction effectiveness of dilute and entangled xanthan in turbulent pipe flow", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 166, pp. 25-31, 2011.