

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

LEANDRO MOTTA LEAL

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS POR
BIOPOLÍMEROS: O IMPACTO DA IDADE DA FOLHA DA BABOSA NA
EFICIÊNCIA DE REDUÇÃO.**

VITÓRIA
2018

LEANDRO MOTTA LEAL

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS POR
BIOPOLÍMEROS: O IMPACTO DA IDADE DA FOLHA DA BABOSA NA
EFICIÊNCIA DE REDUÇÃO.**

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

2018

LEANDRO MOTTA LEAL

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS POR
BIOPOLÍMEROS: O IMPACTO DA IDADE DA FOLHA DA BABOSA NA
EFICIÊNCIA DE REDUÇÃO.**

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 25 de abril de 2018.

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. Sandro José Greco – Examinador interno
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Jair Carlos Checon de Freitas – Examinador externo
Universidade Federal do Espírito Santo

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém.”

Dalai Lama

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por guiar meus passos, provendo-me força, sabedoria e a persistência necessária para seguir em frente e obter mais essa conquista.

Agradeço minha família por todo incentivo, aconselhamento e suporte durante todo o processo, em especial meu pai Fernando José Pires Leal e minha mãe Mirian Motta Leal que sempre me motivaram e torceram pelas minhas conquistas. À eles, minha eterna gratidão, respeito e admiração.

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

Agradeço ao professor Renato do Nascimento Siqueira por sua orientação, respeito e disponibilidade em ajudar e compartilhar seus conhecimentos e experiências.

Agradeço à amiga Doutora em Genética de Plantas Lorraine Fonseca, por todo aconselhamento, boa vontade, sabedoria e disponibilidade para ajudar.

Agradeço também aos amigos de mestrado Luiz Dallas, Ivanor Martins, Diogo Lima, Gabriel Vargas, Renata Trevelin, Gustavo Sandoval. Agradeço em especial ao Daniel Cipriano, Walber Santos, Felipe Malheiros, Aline Bisi e Jordana Lyra pelo esforço e dedicação para a realização desta pesquisa. Desejo sucesso a todos.

Agradeço aos demais amigos por todos os momentos de descontração, alegria e incentivo durante a pesquisa.

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

RESUMO

A adição de pequenas quantidades de polímero em escoamentos turbulentos produz uma significativa redução do fator de atrito. Esse fenômeno, conhecido como redução de arrasto, tem sido estudado por muitos pesquisadores, desde que foi reportado por Toms (1948) devido a sua importância e ampla aplicabilidade. Porém, a maioria dos polímeros normalmente utilizados como redutores de arrasto são sintéticos. Eles são pouco resistentes a altas taxas de cisalhamento e apresentam toxicidade, fatores que dificultam a utilização desses materiais em certas aplicações, como na área médica e meio ambiente. Com isso, a busca por aditivos naturais que reduzem arrasto vem aumentando ao longo do tempo, pois esses materiais geralmente são mais resistentes, biodegradáveis e atóxicos, motivos que os tornam uma boa alternativa para substituir os polímeros sintéticos em algumas aplicações. O presente trabalho propõe um estudo mais aprofundado da mucilagem da planta *aloe vera* como agente natural redutor de arrasto. Para tal, os testes são realizados utilizando uma geometria rotativa composta por cilindros concêntricos de dupla folga e um aparato experimental formado por um sistema de tubos com controle de vazão e pressão. As análises tiveram foco em avaliar se folhas de babosa com idades variadas tinham eficiências diferentes para reduzir o arrasto. Para isso, foi criada uma metodologia para estimar a idade da folha e separar o material em folhas jovens, intermediárias e maduras. A partir daí, com a produção das amostras de teste, os experimentos de redução de arrasto foram conduzidos a mesma concentração entre as idades variadas, tanto no reômetro quanto na bancada experimental. Além disso, foram feitos testes de Ressonância Magnética para avaliar a composição química de cada idade de amostra de babosa e estimar qual constituinte possivelmente atua com mais intensidade no fenômeno de redução de arrasto. Os resultados confirmaram que a eficiência da babosa para reduzir o arrasto depende de sua composição química e conseqüentemente da idade da folha da planta, em que folhas mais novas são mais eficientes.

ABSTRACT

The addition of a small quantity of polymer to turbulent flows produces a significant reduction of the friction factor. This phenomenon, known as drag reduction, has been studied by many researchers, since it was reported by Toms (1948), due its importance and wide applicability. However, most polymers commonly used as drag reducers are synthetic. They are poorly resistant to high shear rates and are toxic, factors that do not allow the use of these materials in certain applications, such as in the medical field and the environment. Thus, the search for natural additives that reduce drag increases over time, because these materials are generally more resistant, biodegradable and non-toxic, reasons that make them a good alternative to replace synthetic polymers in some applications. The present work proposes a more detailed study about mucilage of *aloe vera* as a natural reducing agent. So, tests were performed using a rotating geometry composed by double-gap concentric cylinders and an experimental apparatus formed by a tube system with flow rate and pressure control. The analyzes focused on assessing whether *aloe vera* leaves of varying ages had different efficiencies to reduce drag. For this, a methodology was created to estimate leaf age and separate the material into young, intermediate and mature leaves. Thereafter, with the production of the test samples, the drag reduction experiments were conducted at the same concentration among different ages, in both rheometer and experimental apparatus. In addition, Magnetic Resonance tests were performed to evaluate the chemical composition of each age of the *aloe vera* sample and to estimate which constituent possibly acts most intensively in the phenomenon of drag reduction. The results confirmed that the efficiency of *aloe vera* to reduce drag depends on its chemical composition and consequently of the plant leaf age, in which newer leaves are more efficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede. Dubief e colaboradores (2004)	21
Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008).	23
Figura 1.3 – Processo de esticamento e cisão macromolecular. Soares e colaboradores (2015)	24
Figura 1.4 – Processo de desagregação molecular. Soares e colaboradores (2015)	27
Figura 1.5 – Estrutura da acemanana no gel de <i>aloe vera</i> . Chow e colaboradores (2005).....	31
Figura 1.6 – Estrutura da celulose. Franchetti e Marconato (2006).....	32
Figura 1.7 – Estrutura da pectina. Franco (2015).....	32
Figura 1.8 – Estrutura da glicomanana. Mandal e Das (1980)	33
Figura 1.9 – Estrutura do ácido málico. Jensen (2007)	33
Figura 1.10 – Estrutura do ácido láctico. Kumar e outros (2017)	34
Figura 1.11 – Estrutura do ácido succínico. Nageshwari e colaboradores (2017).....	34
Figura 1.12 – Estrutura do ácido cítrico. Molognoni e outros (2017)	34
Figura 1.13 – Estrutura do ácido pirúvico. Pines e outros (2016).....	35
Figura 1.14 – Estrutura do ácido acético. Kumar e colaboradores (2017)	35
Figura 1.15 – Exemplo da estrutura da lignina. Shi e colaboradores (2017)	36

Figura 1.16 – Estrutura da frutose. Li e outros (2018).....	36
Figura 2.1 – Reômetro Haake Mars II.	39
Figura 2.2 – Desenho esquemático da bancada experimental. Coelho e outros (2016).	40
Figura 2.3 – Exemplo de folha jovem, intermediária e madura.	43
Figura 2.4 – Coleta e limpeza das folhas de babosa.....	44
Figura 2.5 – Etapas de processamento da mucilagem. Barbosa, Soares e Siqueira (2017).....	45
Figura 2.6 – Desenho esquemático da geometria <i>Double Gap</i> . Pereira, Andrade e Soares (2013).....	48
Figura 3.1 – Comportamento reológico das folhas maduras.....	57
Figura 3.2 – Comportamento reológico das folhas intermediárias.	57
Figura 3.3 – Comportamento reológico das folhas jovens.	58
Figura 3.4 – Espectro RMN.....	59
Figura 3.5 – Espectro RMN focalizado.....	60
Figura 4.1 – Tempo necessário para total mistura da amostra em água deionizada.	64
Figura 4.2 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do tempo a 460 ppm.	65
Figura 4.3 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do tempo a 200 ppm.	66
Figura 4.4 – Teste de validação da bancada experimental.	67
Figura 4.5 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do número de passes.....	69

Figura 4.6 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e idades aleatórias	71
Figura 4.7 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e pó de quiabo.....	73
Figura 4.8 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e Goma Xantana.	75

LISTA DE SÍMBOLOS

PAM	Poliacrilamida
PEO	Óxido de Polietileno
XG	Goma Xantana
MDR	máxima redução de arrasto
DRA	agente redutor de arrasto
c	concentração polimérica (ppm)
D_R	razão de arrasto – $D_R = \Delta p / \Delta p_0$
DR	coeficiente de redução de arrasto – $DR = 1 - f / f_0$
$\%DR$	coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
$DR_{m\acute{a}x}$	valor máximo do coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
DR_{assint}	valor assintótico do coeficiente de redução de arrasto em termos percentuais (%)
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)
M_v	massa molecular média (g/mol)
N_p	número de passes da solução pela bancada experimental (un.)
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 aceitavel
N	número de valores da amostra (un.)
ω	velocidade angular do rotor (rad/s)
Hz	hertz
MHz	mega-hertz
T	Tesla

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros para determinação das idades.....	42
Tabela 2.2 - Massas e concentrações folhas maduras coleta 1.....	46
Tabela 2.3 - Massas e concentrações folhas intermediárias coleta 1.	46
Tabela 2.4 - Massas e concentrações folhas jovens coleta 1.	46
Tabela 2.5 - Massas e concentrações folhas maduras coleta 2.....	46
Tabela 2.6 - Massas e concentrações folhas intermediárias coleta 2.	47
Tabela 2.7 - Massas e concentrações folhas jovens coleta 2.	47
Tabela 2.8 - Critério de Chauvenet.	54
Tabela 3.1 – Proporção dos principais constituintes da mucilagem de <i>aloe vera</i>	61

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
SUMÁRIO	XV
CAPÍTULO 1	17
1.1 Motivação	17
1.2 Estado da Arte	19
1.3 Caracterização do problema	37
CAPÍTULO 2	38
2.1 Equipamentos	38
2.1.1 Reômetro	38
2.1.2 Bancada experimental de redução de arrasto	39
2.1.3 Balanças	40
2.1.4 Misturador	41
2.1.5 Espectrômetro.....	41
2.2 Determinação da idade das folhas de <i>aloe vera</i>	41
2.3 Produção do material de teste	43
2.3.1 Extração da mucilagem da planta <i>aloe vera</i>	43

2.4	Descrição dos testes de ressonância magnética nuclear de prótons (RMN de ^1H).....	47
2.5	Descrição dos testes no reômetro	48
2.5.1	Preparo da solução polimérica.....	50
2.5.2	Testes de viscosidade	50
2.5.3	Teste de redução de arrasto	51
2.6	Descrição dos testes na bancada experimental	51
2.7	Critério estatístico para rejeição dos dados.....	54
CAPÍTULO 3		56
3.1	Comportamento reológico	56
3.2	Espectro de ressonância magnética nuclear de prótons (RMN de ^1H)	58
CAPÍTULO 4		63
4.1	Resultado preliminar reômetro	63
4.2	Influência das diferentes idades de folha de <i>aloe vera</i> em testes de redução de arrasto no reômetro	64
4.3	Resultados preliminares bancada experimental.....	67
4.4	Influência das diferentes idades de folha de <i>aloe vera</i> na redução de arrasto na bancada experimental.....	68
4.5	Comparação entre diferentes agentes redutores de arrasto na bancada experimental.....	70
CAPÍTULO 5		76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		79

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A adição de pequenas quantidades de aditivos em escoamentos turbulentos pode proporcionar uma redução de arrasto significativa reduzindo a perda de energia no transporte de fluidos. Diversos aditivos são capazes de produzir esse efeito, como, por exemplo, polímeros, surfactantes, fibras, bolhas de ar, mucilagens¹, etc.

O fenômeno de redução de arrasto foi observado inicialmente por Forrest e Grierson (1931). Toms (1948) e Mysels (1949) também observaram esse fenômeno. O trabalho de Toms ganhou mais notoriedade e hoje a redução de arrasto é as vezes chamado de fenômeno de Toms.

A redução de arrasto é evidentemente de grande interesse prático, como o uso para transporte de líquidos em diversos setores da indústria. Uma das aplicações de grande sucesso é o transporte de petróleo bruto no sistema de dutos conhecido como “*Trans-Alasca Pipe Line*”. O referido oleoduto possui extensão de aproximadamente 1300 km, diâmetro de 48 polegadas e 12 estações de bombeamento. Segundo Burger e Chorn (1980), pequena quantidade de poliolefinas, aditivos solúveis em óleo, é injetada nas estações de bombeamento

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

com o objetivo de aumentar a vazão com uma queda de pressão constante, resultando em um ganho de produção de aproximadamente 30%.

As aplicações da técnica de redução de arrasto utilizando aditivos não se limitam somente ao setor petrolífero. Há diversas áreas e processos industriais em que o referido fenômeno é empregado. Fabula (1971) e Figueiredo e Sabadini (2003) verificaram o efeito da injeção de polímeros no sistema de combate a incêndio, no qual observaram um aumento do alcance dos jatos de água e redução na quantidade de energia para realizar o bombeamento. Larson (2003) constatou o aumento da velocidade de embarcações, devido à redução do atrito entre o casco dos navios e a água, quando era utilizado aditivo nos cascos. Singh e outros (1985) investigaram a aplicação em sistemas de irrigação com o objetivo de aumentar a vazão de água, além de economizar energia no bombeamento. A área da medicina é outro campo de bastante interesse, em que a redução de arrasto também é estudada e os resultados são satisfatórios, como reportado por Mostardi e colaboradores (1978), Unthank e outros (1992) e Chen e colaboradores (2011) para o combate ao derrame e ataque cardíaco causado por aterosclerose e, além disso, por Kameneva e outros (2004) na prevenção da letalidade por choque hemorrágico.

A maioria dos estudos geralmente utiliza polímeros sintéticos como agentes redutores de arrasto, os quais possuem caráter tóxico, por isso não podem ser utilizados com segurança em todas as aplicações, como, por exemplo, na medicina ou meio ambiente. Esse fato tem incentivado muitos pesquisadores a investigarem novos polímeros naturais com boa capacidade em reduzir o arrasto, que são evidentemente mais adequados às aplicações na medicina e outros setores onde a não toxicidade é fundamental.

Sabe-se que diversos aditivos naturais são capazes de proporcionar tal fenômeno, como mucilagens de babosa e quiabo, casca de banana processada e nata de coco em suspensão. Por mais que apresentem poder de redução de arrasto, esses materiais necessitam de um estudo mais aprofundado para que suas características, composições e outras informações relevantes sejam bem conhecidas.

O presente trabalho tem como objetivo analisar, através de um método experimental, o fenômeno de redução de arrasto para soluções aquosas com

mucilagem de babosas de diferentes idades, as quais foram separadas em jovens, intermediárias e maduras. Além disso, é realizado o estudo da composição química das plantas separadas por idade. A ideia por de trás disso é conhecer quais constituintes da planta mais contribuem com a redução de arrasto.

1.2 Estado da Arte

Forrest e Grierson (1931) foram os primeiros a observar o fenômeno de redução de arrasto. Os autores aplicaram fibra de polpa de madeira em escoamento de água e verificaram uma redução do consumo de energia para escoar a solução. Toms (1948) reportou que a diluição de pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular em água reduzia significativamente o fator de atrito do escoamento. O referido autor ainda percebeu que o fenômeno estava associado a escoamentos turbulentos e que a injeção de aditivos aumentava fortemente a vazão considerando uma queda de pressão constante ao longo da tubulação. Toms foi o pioneiro a divulgar em congresso a redução de arrasto, por isso esse fenômeno passou a ser conhecido como "*Toms effect*". Savins (1964) foi o primeiro a introduzir o termo "redução de arrasto" e D_R como a razão entre a queda de pressão da solução e a queda de pressão do solvente durante o escoamento, ambos medidos à mesma vazão e mesmo comprimento de tubulação, de acordo com a Equação 1.

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

Onde ΔP e ΔP_0 representam a queda de pressão da solução e do solvente, respectivamente. Dessa forma, o autor afirmou que uma solução polimérica é redutora de arrasto quando a relação de arrasto (D_R) for inferior a 1. Em termos percentuais, Savins ainda definiu redução de arrasto como descrito na Equação.

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

Uma outra forma de expressar a redução de arrasto, discutida em Lumley (1969), é em função dos fatores de atrito do solvente e da solução, em que se considera que houve redução de arrasto quando o fator de atrito da solução polimérica é inferior ao fator de atrito do solvente utilizado, ambos medidos em um mesmo número de Reynolds. Tal definição é largamente utilizada, definida pela Equação 3;

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

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

As teorias que abordam os mecanismos que ocorrem no fenômeno de redução de arrasto não são completamente aceitas e, por isso, os pesquisadores ainda não explicam tais mecanismos com total clareza. Pode-se dizer que todas ou quase todas as teorias existentes tem como base duas ideias fundamentais. A primeira baseada em efeitos viscosos proposta por Lumley (1973), em que o autor defende que o estiramento das moléculas do polímero provoca aumento da viscosidade extensional do fluido em certas escalas do escoamento turbulento, assim causando supressão das flutuações turbulentas (responsáveis pela dissipação de energia) fora da subcamada viscosa, aumentando a espessura da camada de transição em direção ao centro do tubo e reduzindo a perda de energia do escoamento. Já a segunda ideia é baseada na teoria elástica proposta por Tabor e De Gennes (1986), em que os autores defendem que o efeito do polímero é importante nas pequenas escalas de turbulência, nas quais a energia elástica acumulada pelo estiramento do polímero é responsável pela redução do atrito no momento em que essa energia elástica se equipara à energia cinética turbulenta presente na camada de transição. Deste modo, a cascata de Richardson-Kolmogorov¹ é finalizada prematuramente impedindo que os vórtices maiores se dividam em vórtices menores, os quais são

¹ Baseia-se na hipótese de que os grandes vórtices alimentam de energia os vórtices menores e estes por sua vez transferem energia para vórtices menores ainda. Esse processo resulta em uma transferência de energia na forma de cascata dos vórtices maiores para os menores.

responsáveis pela dissipação de energia do escoamento nas menores escalas de turbulência.

Um estudo relevante a respeito dos mecanismos da redução de arrasto foi proposto por Dubief e colaboradores (2004). Os autores avaliaram o comportamento das moléculas de polímeros flexíveis em um escoamento turbulento através de simulações numéricas realizadas em um canal, onde verificaram que as moléculas trabalham de forma organizada e cíclica armazenando energia dos vórtices e cedendo-a na direção principal do escoamento. Tal relação pode ser observada na Figura 1.1, em que o parâmetro E representa o “trabalho do polímero”, ou seja, a interação entre o polímero e os vórtices turbulentos. Os subscritos x e α referem-se à direção principal do escoamento e qualquer outra direção, respectivamente. A ordenada y^+ e abscissa z^+ são distâncias adimensionais normal à parede. Na posição $y^+ = 5$, há uma redução de energia cinética turbulenta causando o encolhimento do polímero. Em seguida as moléculas encontram a subcamada de transição, região em que $E_\alpha < 0$, onde os polímeros são esticados e armazenam energia ao girar em torno dos vórtices. Ao entrar em contato com a subcamada viscosa, a molécula cede a energia armazenada na direção principal do escoamento ($E_x > 0$), assim se encolhendo novamente. Esse ciclo ocorre inúmeras vezes durante o escoamento.

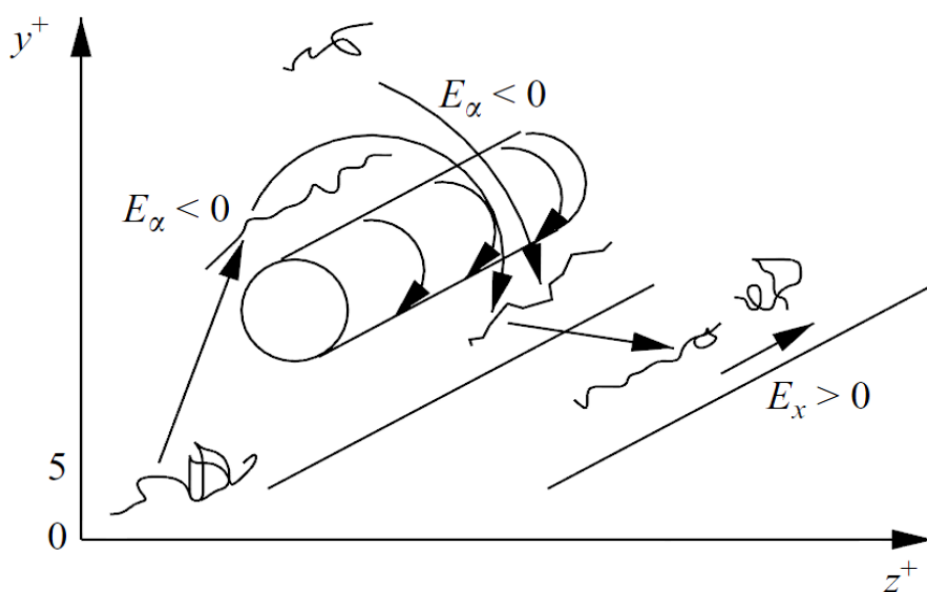


Figura 1.1 – Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede. Dubief e colaboradores (2004)

Um estudo que complementa os trabalhos de Dubief e colaboradores (2004) foi realizado por Pereira e outros (2017). No referido estudo, os autores utilizam simulação numérica direta para simular três casos viscoelásticos e analisar o mecanismo de redução de arrasto no regime transiente em um determinado número de Reynolds. Foi verificado que há três aspectos que têm papel importante na redução do arrasto, que são escoamento cisalhante principal, estiramento do polímero e estruturas turbulentas presentes no escoamento.

Um ponto fundamental para entender o fenômeno em questão diz respeito ao limite máximo de redução de arrasto, proposto por Virk, Mickley e Smith (1967). Os autores utilizaram diversas soluções poliméricas em experimentos de redução de arrasto realizados em dutos com escoamentos turbulentos e verificaram alguns aspectos relevantes. Eles observaram que mantendo o número de Reynolds constante e incrementando a concentração das soluções poliméricas a intensidade de redução de arrasto aumentava até alcançar um valor máximo possível, momento esse em que se atinge uma concentração crítica de tal forma que o incremento da concentração não apresentava mais um aumento na redução de arrasto, pois a solução estava saturada. Esse limite máximo é chamado de máxima redução de arrasto (MDR) ou Lei de Virk. Ainda segundo os autores, outra maneira de se alcançar os níveis máximos de redução de arrasto é manter a concentração fixa e incrementar gradativamente o número de Reynolds. Tais comportamentos são ilustrados na Figura 1.2. O aumento dos níveis de redução de arrasto também é observado com o aumento da massa molecular (M_v).

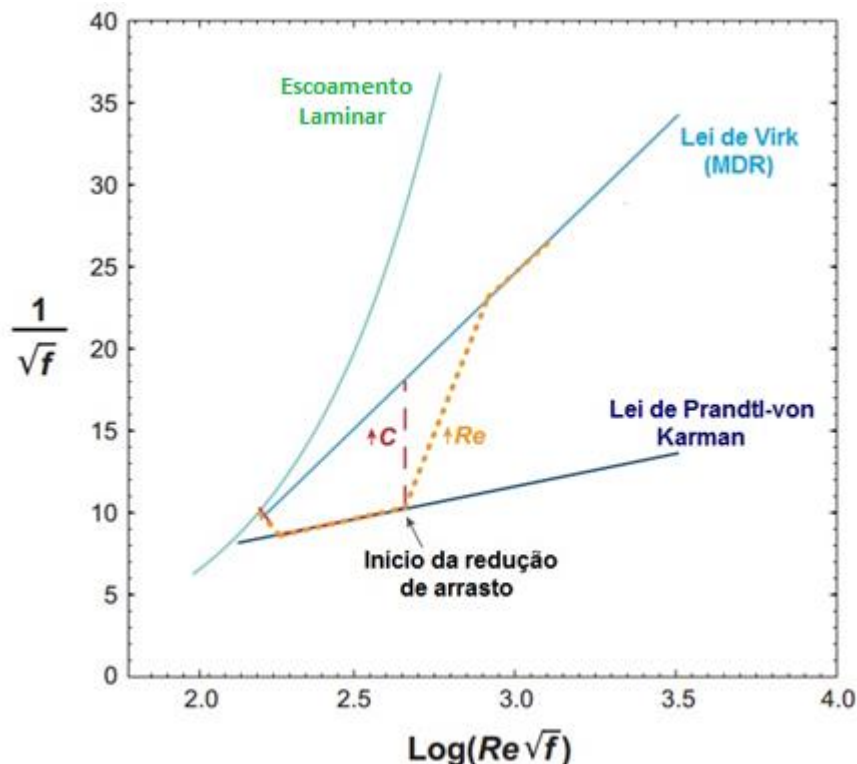


Figura 1.2 – Trajetória da redução por adição de polímeros. White e Mungal (2008).

Conforme White e Mungal (2008), a MDR tem interpretações diferentes. A primeira, baseada na teoria viscosa utilizada por Virk (1975) e Sreenivasan e White (2000), relata que a máxima redução de arrasto possível ocorre quando o efeito do polímero atua em todas as escalas do escoamento fazendo com que a subcamada de transição se estenda por toda a camada limite. A segunda interpretação, baseada na teoria elástica utilizada por Warholic, Massah e Hanratty (1999), Ptasinski e outros (2001) e Min e outros (2004), relata que a MDR acontece quando os tensores de Reynolds são reduzidos completamente e os mecanismos que sustentam a turbulência são conduzidos especialmente pelas flutuações das tensões poliméricas.

O início da redução de arrasto, também apresentado na Figura 1.2, ocorre somente em certo nível de turbulência. Esse assunto divide a opinião de vários pesquisadores em relação às teorias viscosa e elástica. Tratando-se da teoria viscosa, o início da redução de arrasto acontece quando os vórtices da subcamada de transição são aptos a esticar as moléculas poliméricas provocando o incremento da viscosidade extensional e conseqüentemente a supressão das flutuações turbulentas, deste modo aumentando a espessura da subcamada de transição (Lumley, 1969; Ryskin,

1987 e L'vov *et al.* 2004). Já para a teoria elástica, o início da redução de arrasto é sentido quando a energia armazenada pelas moléculas parcialmente esticadas é comparável à energia cinética turbulenta de algumas escalas na região da subcamada de transição, com isso interrompendo prematuramente a cascata de Kolmogorov (Tabor e De Gennes, 1986 e Joseph, 1990).

Outro fator importante a ser descrito é a degradação polimérica, um dos principais problemas quando se utiliza polímeros para reduzir o arrasto. Segundo White e Mungal (2008), a degradação corresponde ao rompimento das macromoléculas gerando moléculas menores devido às tensões do escoamento turbulento, assim causando a perda de eficiência do polímero. Utilizando técnicas de cromatografia de permeação em gel, Merrill e Horn (1984) observaram que as cisões poliméricas ocorrem próximo ao ponto médio das macromoléculas. Os pesquisadores acreditam que o momento em que as macromoléculas estão esticadas e alinhadas com o escoamento é o momento em que ocorre a degradação, fato também relatado por Odell, Keller e Miles (1983). A Figura 1.3 ilustra um esquema de degradação do polímero estudado por Soares e colaboradores (2015). O polímero encontra-se encolhido quando se está repouso e após o início do escoamento (aplicação de taxa de deformação) o mesmo é esticado, momento em que ocorre a cisão mecânica no ponto médio da molécula.

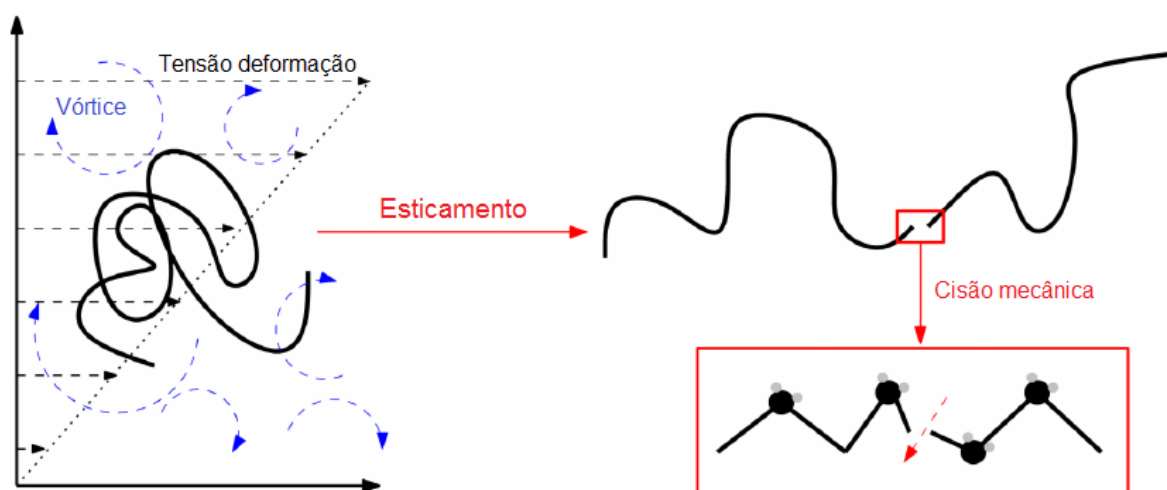


Figura 1.3 – Processo de esticamento e cisão macromolecular. Soares e colaboradores (2015)

Paterson e Abernathy (1970) realizaram um estudo sobre a degradação de soluções de óxido de polietileno (PEO) em escoamento turbulento em dutos. Os

pesquisadores observaram que a degradação das moléculas é acelerada com número de Reynolds mais elevado e que as soluções se tornavam mais resistentes com o aumento da massa molecular ou da concentração. Esses fatos também são observados por Moussa e Tiu (1994).

Vanapalli, Islam e Solomon (2005) estudaram experimentalmente a degradação no escoamento turbulento em dutos com soluções de PEO e Poliacrilamida (PAM). Os autores observaram, através de cromatografia em gel, que havia uma redução da massa molecular média ao longo do processo de degradação quando o número de Reynolds era mantido constante. Além disso, eles verificaram que a redução de arrasto alcançava uma estabilidade atingindo um valor assintótico depois de certo tempo de experimento, momento em que não era observado nenhuma degradação adicional. Esse fato também foi reportado por Choi e outros (2000), Nakken, Tande e Elgsaeter (2001) e Pereira e Soares (2012) nos estudos de degradação polimérica.

Além de materiais flexíveis, como PEO e PAM, de acordo com Kenis (1971), Bewersdorff e Singh (1988), Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares e outros (2015) em estudos com Goma Xantana (XG), Goma Guar e outros, os materiais rígidos também são considerados redutores de arrasto em escoamento turbulento. Os autores verificaram nos estudos dos rígidos que o incremento da concentração e massa molecular do polímero causava aumento da redução de arrasto, assim como ocorre com materiais flexíveis. No entanto, o comportamento de materiais rígidos para reduzir o arrasto ainda carece de mais estudos.

Virk, Sherman e Wagger (1997) afirmaram que os materiais flexíveis e rígidos estão associados a dois mecanismos de redução de arrasto, chamados Tipo A e Tipo B. No mecanismo Tipo A os polímeros flexíveis (PEO, PAM e outros), inicialmente em repouso e encolhidos, necessitam de uma turbulência mínima capaz de esticar suas moléculas para que possa ocorrer a redução de arrasto. Já no mecanismo Tipo B os polímeros rígidos (XG, fibras, mucilagem e outros), inicialmente em repouso e já alongados, a redução do fator de atrito do escoamento ocorre com a mudança do regime laminar para o regime turbulento. Gasljevic, Aguilar e Matthys (2001) também estudaram esses dois tipos de mecanismos. Os pesquisadores reportaram que os polímeros que apresentam comportamento do Tipo B já se encontram esticados antes do início da redução de arrasto, por isso sua configuração molecular não é

alterada com o aumento da turbulência. Além disso, os materiais que apresentam comportamento do Tipo A passam a apresentar comportamento do tipo B quando suas moléculas alcançam o estiramento máximo e ainda não existe uma degradação significativa.

Os polímeros rígidos podem ser encontrados na natureza e possuem como vantagem, comparado aos materiais flexíveis, grande resistência a degradação mecânica. Por outro lado, por serem naturais, são sensíveis a degradação biológica. Kenis (1971) realizou estudos comparando diversos materiais como Goma Xantana e Goma Guar (materiais rígidos) com PEO e PAM (materiais flexíveis). O pesquisador observou que os rígidos possuem maior estabilidade das cadeias poliméricas confirmando maior resistência a degradação mecânica. Sohn e outros (2001) também verificaram o mesmo fato. Soares e colaboradores (2015) estudaram a resistência de alguns materiais, como Goma Xantana, PEO e PAM, utilizando bomba ou ar comprimido no aparato experimental se tratando de escoamento turbulento em dutos, ou seja, na configuração sem bomba a solução polimérica é deslocada por ar comprimido. O resultado dos testes com Goma Xantana (material rígido), feitos com mesmo número de Reynolds em ambas as configurações, não apresentaram variação considerável em termos de redução de arrasto, portanto o cisalhamento da bomba centrífuga não gera degradação mecânica adicional à solução. Por outro lado, os testes com os materiais flexíveis PEO e PAM, quando submetidos a diferentes configurações do aparato experimental, apresentaram resultados diferentes comparado com os obtidos utilizando material rígido (XG). Os pesquisadores verificaram que os polímeros flexíveis têm uma queda drástica na redução de arrasto quando submetidos à degradação localizada na bomba.

De acordo com Pereira, Andrade e Soares (2013) e Soares e colaboradores (2015), os polímeros flexíveis têm como característica a degradação polimérica. Já as moléculas de materiais rígidos, como a Goma Xantana, formam agregados compostos de cadeias moleculares (moléculas ligadas por forças intermoleculares), com isso os autores supõem que as tensões de cisalhamento impostas à solução em um escoamento turbulento quebram essas ligações causando a desagregação das moléculas reduzindo seu comprimento médio, deste modo fazendo com que a solução perca eficiência para reduzir o arrasto. Essa teoria da redução da eficiência na redução do arrasto proposta por Soares e outros (2015) foi seguida por Coelho e

colaboradores (2016) em seus estudos com mucilagem e fibra de quiabo. Tal teoria é ilustrada pela Figura 1.4, em que inicialmente duas moléculas de um polímero rígido estão em repouso e conectadas por forças intermoleculares. Após o início do escoamento a tensão de deformação causa a desagregação ou desaglomeração das moléculas.

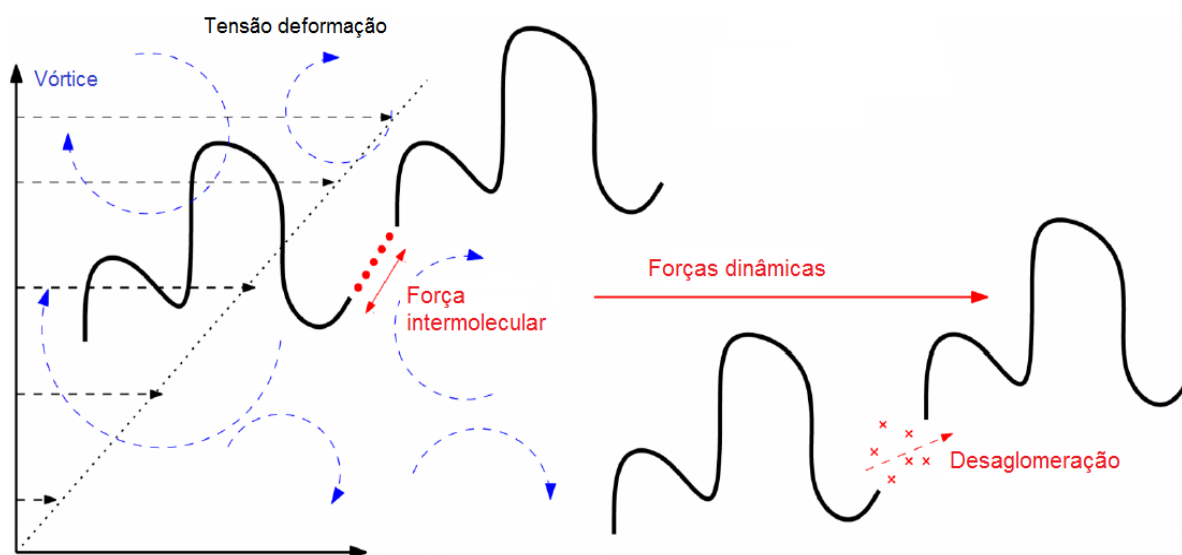


Figura 1.4 – Processo de desagregação molecular. Soares e colaboradores (2015)

Os polímeros sintéticos, como PEO e PAM, são largamente utilizados em grande parte dos estudos de redução de arrasto, os quais têm como característica boa eficiência, porém baixa resistência as tensões cisalhantes exercidas pelo escoamento turbulento. Os polímeros sintéticos apresentam valor comercial elevado em comparação aos polímeros naturais e são tóxicos, motivo pelo qual impede sua utilização em áreas que envolvem, por exemplo, a medicina e meio ambiente. Por causa disso, diversos pesquisadores estão direcionando seus esforços para substituir os materiais sintéticos por materiais naturais (não tóxicos) para reduzir o arrasto.

Um dos aditivos naturais mais utilizados nos estudos de redução de arrasto é a Goma Xantana, que é um polissacarídeo obtido a partir da fermentação das bactérias *Xanthomonas Campestris*. Esse material é mais barato comparado aos polímeros sintéticos, além disso não degrada mecanicamente pelo fato de ser um polímero rígido. Com isso, tal aditivo natural se tornou uma boa alternativa para as aplicações em que o sintético não é recomendado. As características da XG como

agente redutor de arrasto (DRA) foram estudadas por vários pesquisadores, dentre eles Morris (1977), Muller e outros (1986), Bewersdorff e Singh (1988), Wyatt, Gunther e Liberatore (2011), Pereira, Andrade e Soares (2013), Andrade, Pereira e Soares (2014), Soares e outros (2015) Sandoval e Soares (2016) e Andrade, Pereira e Soares (2016).

Há ainda outros materiais naturais redutores de arrasto provenientes de plantas, porém, carecem de um estudo mais aprofundado. Singh, Jaafar e Yusup (2014) ressaltaram o potencial dos polímeros naturais como DRA, pois não prejudicam o meio ambiente pela contaminação do solo. Os autores utilizaram Carboximetilcelulose como DRA proveniente da casca de banana sintetizada. Eles observaram que o referido material é um bom redutor de arrasto e sua solubilidade aumenta com o incremento da concentração de hidróxido de sódio (NaOH).

Outro aditivo natural é a Goma Guar. Phukan e outros (2001) estudaram tal aditivo e realizaram uma comparação entre a Goma Guar comercial e sua versão purificada com o intuito de melhorar a irrigação por aspersão e percolação no solo. Os autores notaram que a versão purificada do material apresentava maior eficiência comparada com a versão comercial, pois houve aumento da área de cobertura no processo de irrigação e redução da taxa de infiltração quando utilizado o aditivo purificado. Portanto, para áreas com escassez de chuvas, os efeitos dos materiais naturais são úteis.

Polissacarídeos provenientes de microalgas marinhas também são agentes redutores de arrasto. Gasljevic e colaboradores (2008) realizaram uma série de experimentos com polissacarídeos de diferentes espécies de algas em questão de produtividade e capacidade em reduzir arrasto, no qual muitas espécies mostraram bom desempenho em ambos os aspectos.

Ogata e Warashina (2014) utilizaram Nata de Coco em suspensão como DRA em escoamento turbulento em dutos. Os pesquisadores observaram uma redução de arrasto acima de 25% para uma concentração de cerca de 50 ppm após a Nata de Coco formar uma rede em suspensão, que reduz o arrasto mais intensamente com o aumento do tamanho das fibras. Outros autores que utilizaram Nata de Coco em seus estudos foram Salehudin e Ridha (2016). Eles extraíram um material natural da

Nata e alcançaram 35% de redução de arrasto para a concentração de 500 ppm na vazão de 2 m³/h.

A utilização da mucilagem extraída do quiabo como DRA natural também já foi estudada por alguns autores, como, por exemplo, Abdulbari e colaboradores (ABDULBARI *et al.*, 2010, 2012 e 2014). Abdulbari, Ahmad e Yunus (2010) avaliaram os efeitos da variação do diâmetro da tubulação, concentração do material e número de Reynolds, parâmetros estes que podem influenciar na capacidade de reduzir o arrasto. Ainda a respeito da variação do diâmetro, tais autores relatam, em seus estudos com mucilagem de quiabo, que quanto maior o diâmetro da tubulação, para testes a mesma vazão e concentração, menor a capacidade de reduzir o arrasto. Abdulbari, Kamarulizan e Nour (2012) utilizaram dois solventes diferentes (água e hidrocarboneto líquido) para estudar a mucilagem do quiabo. Nos testes com hidrocarboneto foi utilizado um processo para modificar as moléculas da mucilagem com o objetivo de prover solubilidade. Abdulbari, Shabirin e Abdurrahman (2014) apresentaram uma revisão sobre DRA natural, dentre eles a mucilagem do quiabo, na qual afirmaram ser uma boa alternativa aos polímeros artificiais. Já Coelho e outros (2016) e Soares e outros (2016) utilizaram como DRA natural fibra e mucilagem de quiabo. Os pesquisadores avaliaram o potencial de redução de arrasto à medida que a concentração era aumentada e, além disso, estudaram a degradação biológica do material.

Outro aditivo natural que tem potencial para reduzir o arrasto é a mucilagem de babosa, também conhecida como *aloe vera*, que é um fluido viscoso e possui estrutura molecular complexa. A maioria dos trabalhos que abordam a mucilagem de *aloe vera* como DRA está relacionada a aplicações na área da medicina. Kameneva e outros (2004) e Macias e colaboradores (2004) realizaram testes em animais cobaias submetidos a choque hemorrágico letal, em que utilizaram fluido de ressuscitação (fluido com características semelhantes a do sangue) como solvente. Os pesquisadores observaram nitidamente o aumento da taxa de sobrevivência utilizando o aditivo. Essa observação também foi verificada por Sakai e outros (2007), em que ele utilizou babosa como DRA em artérias coronárias¹ de animais

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

cobaias. Kameneva (2012) estudou a mucilagem de *aloe vera* como agente redutor de arrasto para produzir efeitos hemodinâmicos em animais cobaias havendo aumento da perfusão tecidual e redução da resistência vascular periférica, sem que houvesse aumento da pressão arterial sanguínea e alteração da viscosidade, fato de extrema importância em casos de hemorragias graves, pois o incremento da pressão arterial pode causar hemorragias secundárias. Abdulbari, Letchmanan e Yunus (2011) obtiveram resultados satisfatórios utilizando mucilagem de babosa em escoamento turbulento em dutos. Os autores alcançaram 37% de redução de arrasto para a concentração de 400 ppm. Já para a concentração de 200 ppm, os autores atingiram por volta de 27% de redução. Barbosa, Soares e Siqueira (2017) avaliaram em seus estudos o efeito da variação da concentração da mucilagem em relação aos níveis de redução de arrasto. Além disso, realizaram estudos sobre o pó da casca da folha de *aloe vera* e sua sinergia com a mucilagem em termos de redução de arrasto.

Outro aspecto importante a ser abordado é a composição química do gel da babosa, aspecto que possivelmente pode afetar a eficiência de sua mucilagem em reduzir o arrasto. Muitos autores obtiveram êxito ao caracterizar o gel da *aloe vera*, porém a quantidade de cada constituinte pode variar devido a diversos motivos, como localização geográfica, clima, espécie e idade da planta, períodos de crescimento, irrigação, preparo da mucilagem, entre outros (Yaron, 1993; Ray e Aswatha, 2013; Ray e Gupta, 2013). Grindlay e Reynolds (1986), Femenia e colaboradores (1999) e Pandhair e colaboradores (2011) em seus estudos de caracterização da mucilagem observaram que a água é o principal constituinte, geralmente variando entre 94 a 99,5% aproximadamente. Considerando a matéria seca, cerca de 70% é referente a carboidratos e o restante da composição se divide em lipídios, minerais, vitaminas, proteínas, compostos fenólicos, ácidos, entre outros (Roboz e Smit, 1948; Scala *et al.*, 2013). Ainda sobre os carboidratos, eles são compostos de monossacarídeos e polissacarídeos (junção de vários monossacarídeos), em que o mais importante são as cadeias longas de polissacarídeos, pois é o componente que tende a fornecer viscoelasticidade às mucilagens (Bourbon *et al.*, 2010; Pandley e Singh, 2016). No entanto, Marhefka (2007) afirma que a estrutura ativa na *aloe vera* que promove a redução de arrasto ainda é desconhecida. Segundo Mandal e Das (1980), Bozzi e outros (2007) e Muños e colaboradores (2015), os polissacarídeos presentes na

babosa são acemanana, glicomanana, celulose e pectina. De acordo com Gowda e colaboradores (1979) e Femenia e outros (1999), a acemanana é um dos principais polissacarídeos da composição da mucilagem da babosa e possui uma longa cadeia de monossacarídeos (açúcares). Chow e colaboradores (2005) apresenta a estrutura deste componente, conforme Figura 1.5. Os autores se basearam em dados de cromatografia e análises da composição de carboidratos, de ligação e de ressonância magnética nuclear, deste modo verificando que a molécula do referido polissacarídeo é composta principalmente por manose e glicose contendo ligação com galactose, que são açúcares. Essa constatação também foi reportada por Bozzi e outros (2007) e Chinchilla e outros (2013).

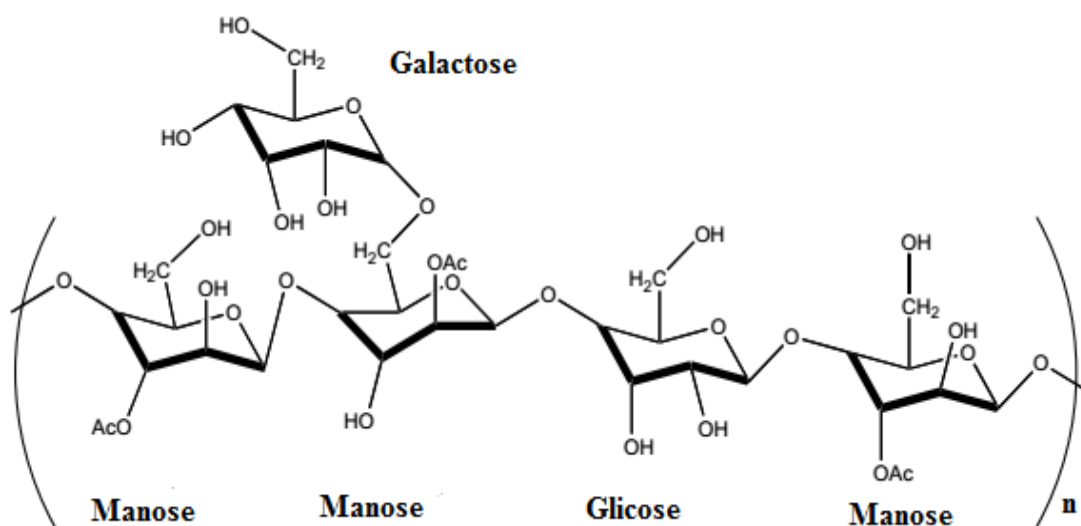


Figura 1.5 – Estrutura da acemanana no gel de *aloe vera*. Chow e colaboradores (2005)

Outro polissacarídeo presente no gel de *aloe vera* é a celulose. De acordo com Jarvis (2017) e Turner e Kumar (2017), ela é formada por cadeias lineares de glicose e está presente na parede celular das plantas. Franchetti e Marconato (2006) apresentam a celulose de acordo com a Figura 1.6.

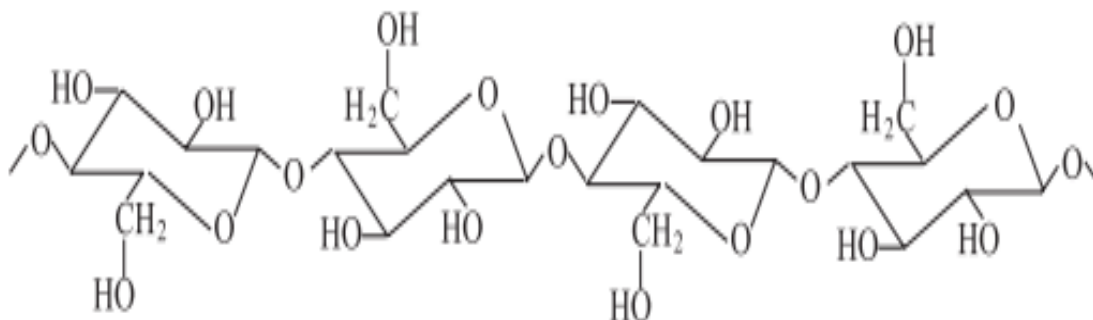


Figura 1.6 – Estrutura da celulose. Franchetti e Marconato (2006)

Segundo Fuentes e colaboradores (2017), além da celulose, outro polissacarídeo presente na parede celular da *aloe vera* é a pectina. Tal constituinte é encontrado em frutas e verduras e tem alta capacidade de formar um gel viscoso. Sua estrutura é composta por unidades de ácido galacturônico como apresentado na Figura 1.7, de acordo com Franco (2015).

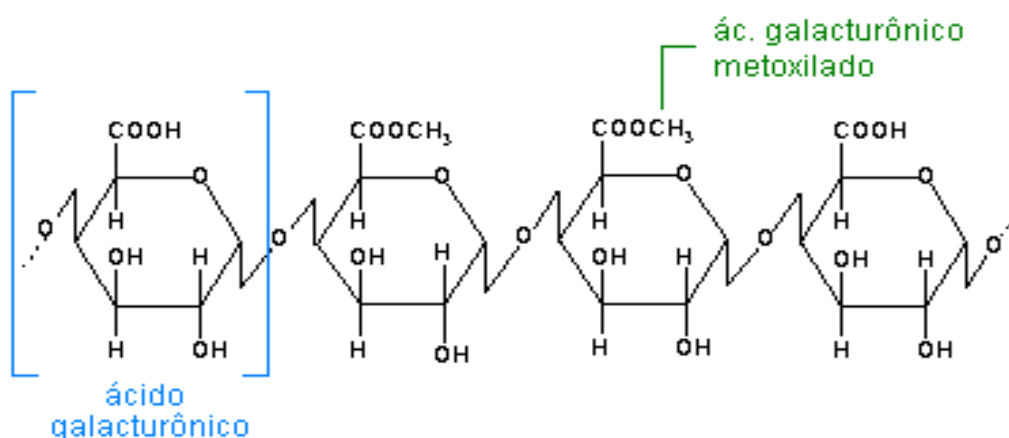


Figura 1.7 – Estrutura da pectina. Franco (2015)

Há ainda presença do polissacarídeo glicomanana. De acordo com Mandal e Das (1980), tal polissacarídeo é composto de uma cadeia de glicose e manose como mostrado na Figura 1.7, em que a manose está presente em maior quantidade.

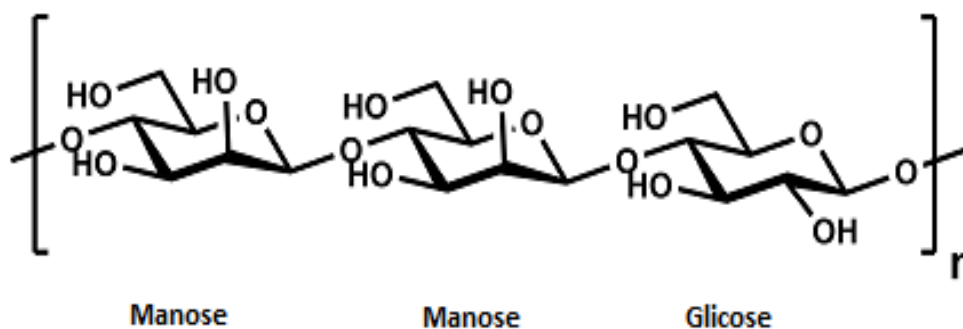


Figura 1.8 – Estrutura da glicomanana. Mandal e Das (1980)

Segundo Jensen (2007) e Bozzi e outros (2007), outro componente natural presente na babosa é o ácido málico, que é um ácido orgânico encontrado geralmente em frutas, como, por exemplo, a maçã. A estrutura deste ácido é apresentada por Jensen (2007) na Figura 1.8.

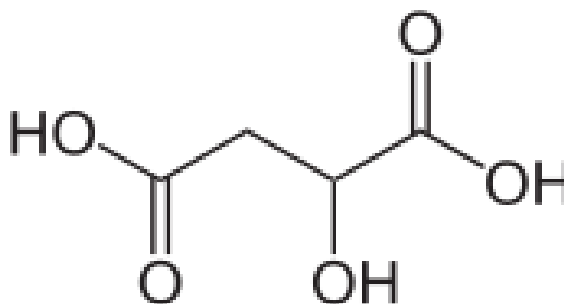


Figura 1.9 – Estrutura do ácido málico. Jensen (2007)

Alguns outros tipos de ácidos orgânicos podem ser encontrados na mucilagem da planta estudada, como ácido láctico, succínico, cítrico, pirúvico e acético. O ácido láctico é um componente encontrado principalmente nos sucos de carnes, leite e plantas. Segundo Bozzi e outros (2007), o referido ácido, quando presente na babosa, é o resultado da degradação biológica do gel causando a degradação dos polissacarídeos. Kumar e outros (2017) apresenta a estrutura do ácido láctico na Figura 1.9.

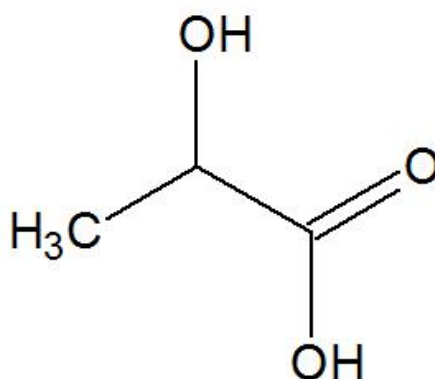


Figura 1.10 – Estrutura do ácido láctico. Kumar e outros (2017)

O ácido succínico é aquele que participa do metabolismo energético em células animais e vegetais. Tal constituinte é apresentado por Nageshwari e colaboradores (2017) na Figura 1.10.

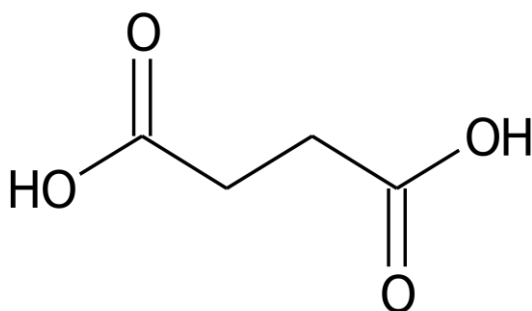


Figura 1.11 – Estrutura do ácido succínico. Nageshwari e colaboradores (2017)

O ácido cítrico é um ácido orgânico solúvel em água, biodegradável, presente em alimentos cítricos como limão, laranja e tangerina. A estrutura do referido ácido é apresentada por Molognoni e outros (2017) na Figura 1.11.

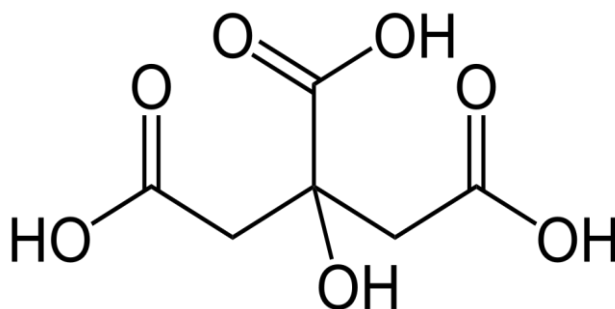


Figura 1.12 – Estrutura do ácido cítrico. Molognoni e outros (2017)

O ácido pirúvico é uma substância orgânica resultante da degradação da glicose. Tal substância é ilustrada na Figura 1.12, de acordo com Pines e outros (2016).

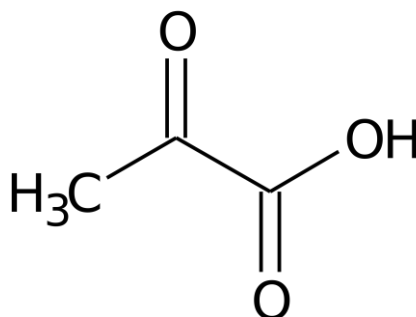


Figura 1.13 – Estrutura do ácido pirúvico. Pines e outros (2016)

Já o ácido acético, também chamado de ácido etanoico, é uma substância orgânica solúvel em água proveniente da oxidação do etanol presente no gel da babosa. O referido ácido é ilustrado na Figura 1.13, segundo Kumar e colaboradores (2017).

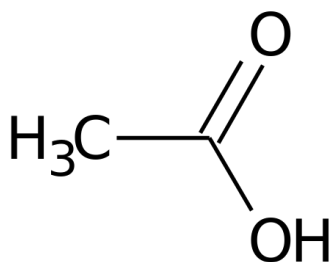


Figura 1.14 – Estrutura do ácido acético. Kumar e colaboradores (2017)

Um grupo que também compõe a mucilagem da *aloe vera* são os compostos fenólicos, dentre eles um dos mais relevantes é a lignina. De acordo com Bozzel, O'Lenick e Warwick (2011) e Chatterjee e outros (2013), a lignina é um polifenol presente na parede celular de plantas, o que significa que é um composto fenólico constituído de vários anéis aromáticos ligados a hidroxilas. Fato ilustrado por Shi e colaboradores (2017) na Figura 1.14.

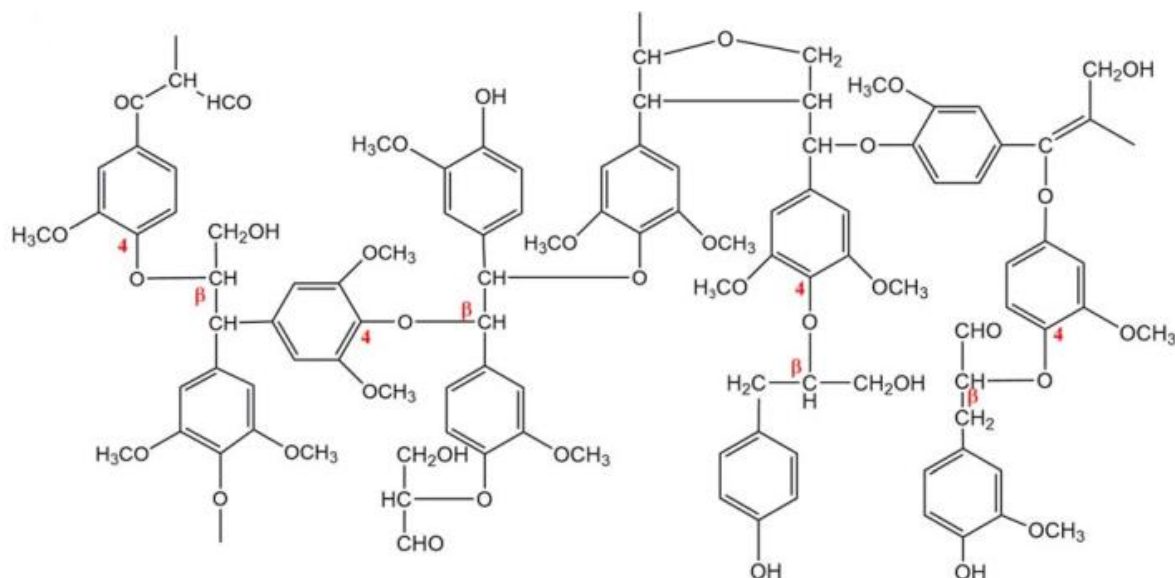


Figura 1.15 – Exemplo da estrutura da lignina. Shi e colaboradores (2017)

É importante abordar sobre um monossacarídeo que também é encontrado no gel de babosa, a frutose. Tal monossacarídeo é um açúcar natural comumente encontrado nas frutas. Sua estrutura é apresentado por Li e outros (2018) na Figura 1.15.

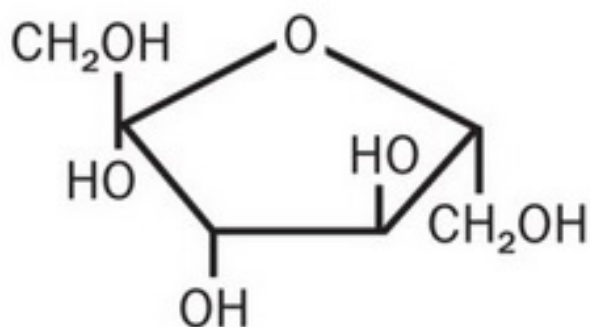


Figura 1.16 – Estrutura da frutose. Li e outros (2018)

Apesar de poucos trabalhos na área de redução de arrasto, os estudos demonstram o potencial da *aloe vera* como DRA natural e indicam que ela pode ser uma boa alternativa aos redutores de arrasto sintéticos. É necessário estudar mais profundamente esse aditivo natural para verificar suas características e comportamentos quando submetidos a escoamentos turbulentos, além de analisar sua composição química, o que é fundamental para estimar qual constituinte presente na mucilagem possivelmente mais contribui para reduzir o arrasto. Essa

constatação ainda não é conclusiva, portanto o presente trabalho busca realizar tal análise.

1.3 Caracterização do problema

Embora a maioria dos estudos utilize materiais sintéticos para reduzir arrasto, tais materiais são incapazes de atender todas as aplicações práticas devido algumas de suas características, como baixa resistência à degradação mecânica além de possuir certa toxicidade, o que impede a utilização desses aditivos sintéticos nas áreas de medicina e meio ambiente. Com isso, os materiais naturais com potencial para reduzir arrasto podem ser uma alternativa quando a utilização dos aditivos sintéticos não for aconselhável. Portanto, o presente trabalho é dedicado ao estudo mais aprofundado da mucilagem de *aloe vera* como agente redutor de arrasto natural. Partindo do princípio que a planta muda sua constituição química com o envelhecimento, os testes de redução de arrasto foram feitos com amostras de plantas com diferentes idades (jovens, intermediárias e maduras). Comparando as eficiências das amostras com suas respectivas composições química, pode-se inferir quais constituintes possivelmente são os maiores responsáveis pela redução de arrasto. Portanto, foi feito testes de redução de arrasto no reômetro em duas concentrações diferentes para cada idade de folha de babosa estudada. Além disso, tais testes também foram conduzidos na bancada experimental, além da realização de testes de ressonância magnética nuclear para avaliar a composição química presente na mucilagem.

CAPÍTULO 2

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

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

2.1 Equipamentos

2.1.1 Reômetro

As análises de viscosidade e redução de arrasto das soluções de teste foram feitas utilizando um reômetro modelo HAAKE MARS II, conectado a um banho termostático do tipo Thermo Haake Phoenix II modelo P1-C50P para controle de temperatura durante os testes, ambos fornecidos pela empresa *Thermo Scientific*. A Figura 2.1 apresenta tais equipamentos com seus principais componentes. O rotor do reômetro é acionado após injeção de ar comprimido proveniente de um compressor modelo MSV 12/175 isento de óleo, fabricado pela empresa Schulz.



- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Cabeçote | 5. Estrutura para fixar o copo |
| 2. Estrutura de fixação de geometrias | 6. Painel de controle manual |
| 3. Geometria de teste | 7. Painel de controle do banho |
| 4. Copo fixo | 8. Termostatos com refrigeração |

Figura 2.1 – Reômetro Haake Mars II.

2.1.2 Bancada experimental de redução de arrasto

Diversos pesquisadores têm direcionado seus estudos de redução de arrasto para escoamentos turbulentos em dutos, mesmo que esse tipo de método envolva maior quantidade da solução a ser estudada, grande aparato experimental, maior custo e tempo para realização dos experimentos. Autores como Virk (1975), Bewesdorff e Singh (1988) e Elbing, Winkel e Solomon (2009) aproveitaram o grande benefício de se usar uma bancada experimental, que é atingir regimes turbulentos condizentes aos apresentados em aplicações práticas, com isso promovendo uma situação de fluxo similar ao que é visto na realidade industrial. A fim de atingir um nível de turbulência maior assim como os autores citados, o aparato utilizado em testes de redução de arrasto, além do reômetro, foi uma bancada experimental composta por tubulações retas de seção circular, em que a solução de teste é deslocada por uma bomba centrífuga modelo CAM-W6C fabricada pela empresa Dancor. A bancada usada no presente trabalho está esquematizada na Figura 2.2. Alguns trabalhos já foram feitos na mesma bancada, como o de Soares e outros (2015), Sandoval e Soares (2016) e Coelho e outros (2016).

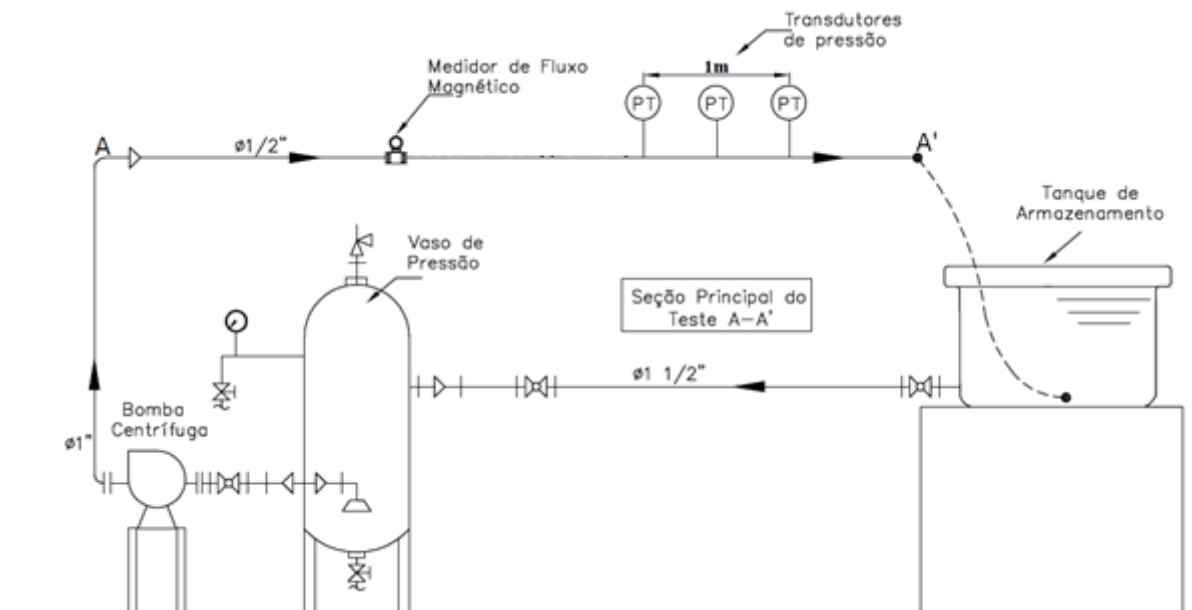


Figura 2.2 – Desenho esquemático da bancada experimental. Coelho e outros 2016).

De acordo com a Figura 2.2, a seção principal de testes possui um medidor de vazão magnético com incerteza de 0,5% (modelo Rosemount 8732, fabricante Emerson Progress) e três transdutores de pressão estática com faixa de medição de 0 a 500 kPa (4 a 20 mA) e incerteza de 0,0057 mA (modelo WTP – 4010, fabricante Warme). Tais transdutores estão instalados em uma parte da tubulação em que o escoamento turbulento é completamente desenvolvido ($l/D = 400$) e estão acoplados em pequenos orifícios em um tubo de aço inoxidável de 1400 milímetros de comprimento com diâmetro interno de 16,35 milímetros. As tomadas de pressão foram feitas com distância de 500 milímetros entre os transdutores. A tubulação passou por um processo de brunimento para garantir que a medida do diâmetro interno fosse constante. A medição desse diâmetro foi feita em alguns pontos por meio de micrometro interno (*Fur-o-test*). Por fim, a seção principal de teste (A-A') possui aproximadamente 9,7 metros de comprimento.

2.1.3 Balanças

Para a pesagem da mucilagem redutora de arrasto foi utilizada uma balança analítica eletrônica, modelo ABT 302-4M do fabricante KERN & SOHN GmnH, com capacidade de 320 g e precisão de 0,1 mg. Outra balança foi utilizada para

determinação da massa do solvente no preparo das soluções. A referida balança é semi-analítica, modelo WT 1000 classe III do fabricante WEIGHTTECH, com capacidade de 50 kg e precisão de 10 g.

2.1.4 Misturador

Para acelerar e assegurar o processo de homogeneização das soluções usadas nos testes com reômetro, as soluções foram misturadas utilizando um agitador eletromagnético Nalgon HOTLAB II.

2.1.5 Espectrômetro

Para gerar o espectro de componentes químicos presentes nas amostras de mucilagem de babosa, as análises de RMN de ^1H (ressonância magnética nuclear de prótons) foram efetuadas em um espectrômetro Varian-Agilent 400. Trata-se de um equipamento com sondas de análises para líquidos e sólidos, operando com frequência de 399,73 MHz para prótons (^1H) e 100,52 MHz para carbono (^{13}C), o que corresponde a um campo magnético de 9,4 Tesla. Este campo é gerado por um ímã supercondutor resfriado com hélio líquido. Utilizou-se uma sonda de radiofrequência (RF) de tripla ressonância com rotores de 4 mm de diâmetro.

2.2 Determinação da idade das folhas de *aloe vera*

Como já foi mencionado, os testes de redução de arrasto foram realizados com diferentes idades de folha da planta babosa. A idade dessas folhas foi analisada de acordo com alguns parâmetros que podem ser observados na Tabela 2.1, onde são encontrados valores médios referentes às medidas de todas as folhas coletadas. Deste modo, o lote de babosa coletado foi dividido em folhas jovens, intermediárias e maduras.

Tabela 2.1 – Parâmetros para determinação das idades.

Tipo de folha	Comprimento (cm)	Espessura máx (cm)	Largura máx (cm)	Área foliar (cm ²)	Local de inserção na planta	Cor
Jovens	25,6	1,1	2,9	41,3	Topo	Verde claro
Intermediárias	36,8	1,6	4,3	96,5	Parte média	Verde
Maduras	52,2	1,9	5,5	338,3	Base	Verde escuro com manchas

O comprimento, espessura e largura máxima de cada folha foram medidos de forma manual utilizando uma fita métrica. A área foliar foi obtida através do software ImageJ. O local de inserção de cada tipo de folha e sua respectiva cor foram determinados por observação da planta no momento da coleta. Os parâmetros verificados na Tabela 2.1 são comumente utilizados por autores que trabalham com plantas e visam estimar se suas folhas são mais novas ou mais velhas, tais como Paleari e Dos Santos (1998), Monteiro e outros (2005), Bailey e colaboradores (2005) e Lima e outros (2011).

Para se ter melhor dimensão das folhas utilizadas é interessante observar a Figura 2.3, na qual é possível verificar na sequência uma folha jovem, intermediária e madura.

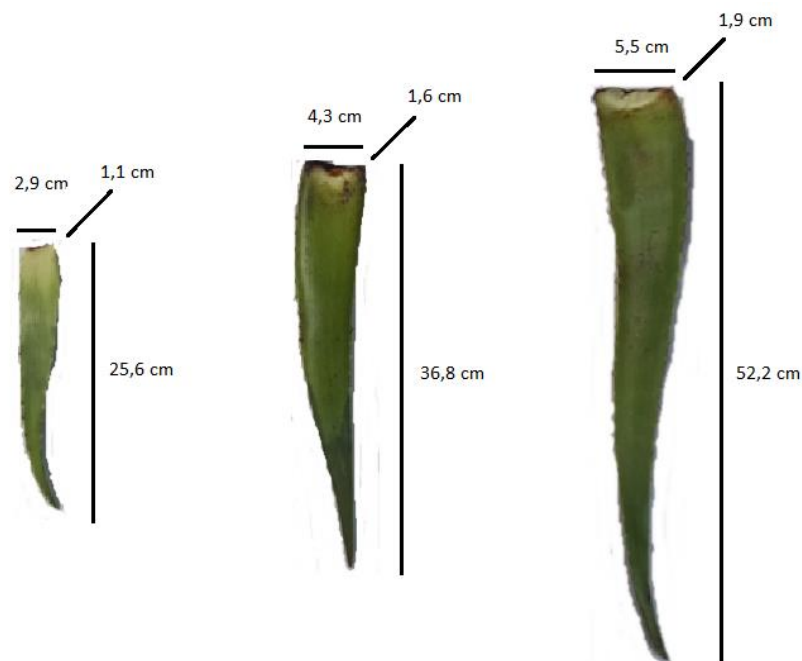


Figura 2.3 – Exemplo de folha jovem, intermediária e madura.

2.3 Produção do material de teste

No presente trabalho a mucilagem extraída da folha da planta *aloe vera*, proveniente da espécie *Aloe barbadensis miller*, é utilizada como agente redutor de arrasto.

2.3.1 Extração da mucilagem da planta *aloe vera*

A folha da planta *aloe vera* foi submetida a diversas etapas de processamento até a obtenção do produto final utilizado nos testes pela mesma metodologia usada por Barbosa *et al.* (2017). Primeiramente foi feito a coleta, lavagem e secagem ao ar das folhas na região de Pancas, Espírito Santo, como mostra a Figura 2.4. Foram feitas duas coletas, sendo a primeira no mês de julho para testes no reômetro e a segunda no mês de outubro para testes na bancada experimental.



Figura 2.4 – Coleta e limpeza das folhas de babosa.

Após a coleta e limpeza das folhas, as mesmas foram levadas para o Laboratório de Reologia da Universidade Federal do Espírito Santo para serem processadas. Tal processamento iniciou-se com a remoção da casca da folha, no qual foi obtido um gel (fibra mais mucilagem) presente no interior da folha que passou por um mecanismo de quebra (moagem) para liquidificá-lo. A solução obtida com a moagem foi filtrada em tecido 100% poliéster e poroso chamado Tule, deste modo retirando as fibras de tamanho maiores e algumas impurezas. Em seguida a solução passou por 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 todo o processo de filtragem com Tule e peneiras, foi obtida uma solução de mucilagem concentrada.

A Figura 2.5 apresenta cada etapa mencionada do processamento, conforme Barbosa, Soares e Siqueira (2017). A letra (A) ilustra a folha de *aloe vera* em sua forma integral; (B) extração do gel presente no interior da folha; (C) gel extraído da folha; (D) moedor de grãos utilizado para quebrar as estruturas do gel (moagem por cisalhamento); (E) primeira filtragem da solução com tecido Tule; (F) e (G) representação e filtragem com peneiras; (H) mucilagem concentrada em sua forma final, que foi utilizada nos testes de redução de arrasto neste trabalho.

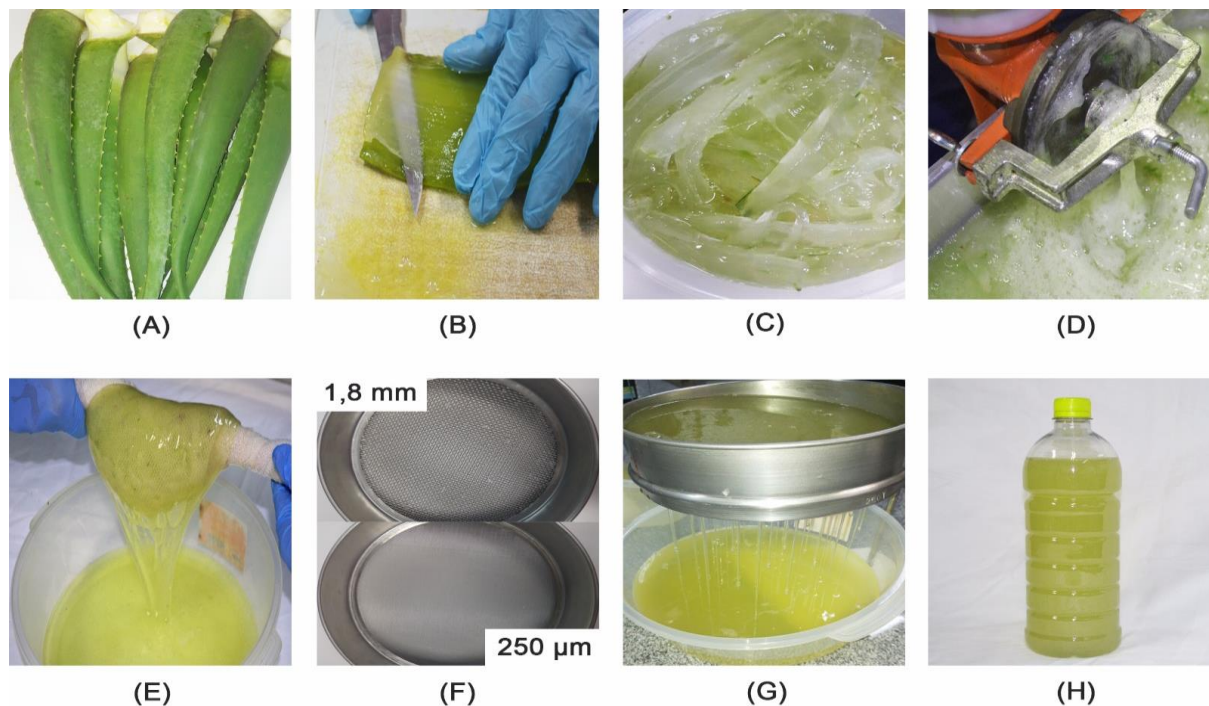


Figura 2.5 – Etapas de processamento da mucilagem. Barbosa, Soares e Siqueira (2017)

Após a produção da mucilagem de cada idade de folha, uma pequena quantidade de amostra foi retirada para determinar a concentração. O restante foi dividido em frascos de 20 ml para testes no reômetro e 400 ml para testes na bancada experimental, ambos congelados no mesmo dia da produção.

Para determinar a concentração, a amostra coletada foi dividida em três placas de petri (recipientes de vidro). A massa de mucilagem em cada placa foi obtida por pesagem e em seguida os recipientes foram colocados na estufa à 60°C por 48 horas. Após esse tempo as amostras estavam completamente secas (massa constante), com isso as placas foram pesadas novamente e a massa sólida existente na mucilagem foi determinada. A concentração foi calculada a partir da relação entre a massa sólida existente e a massa da mucilagem inicial. As tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 mostram os resultados das pesagens dos diferentes tipos de folha referente à primeira coleta utilizados nos testes do reômetro, já as tabelas 2.5, 2.6 e 2.7 ilustram os resultados referentes à segunda coleta de folhas utilizadas nos teste da bancada experimental. As referidas tabelas apresentam valores de massa como resultado da média de três pesagens.

Tabela 2.2 - Massas e concentrações folhas maduras coleta 1.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	117,9968	0,7350	6229
2	112,2545	0,7000	6236
3	117,4900	0,7300	6213
		Média	6226

Tabela 2.3 - Massas e concentrações folhas intermediárias coleta 1.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	99,9167	0,4839	4843
2	94,9367	0,4604	4849
3	99,4900	0,4829	4853
		Média	4848

Tabela 2.4 - Massas e concentrações folhas jovens coleta 1.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	97,2967	0,7100	7297
2	96,5267	0,7033	7286
3	98,2867	0,7167	7292
		Média	7292

Tabela 2.5 - Massas e concentrações folhas maduras coleta 2.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	91,0267	0,7434	8166
2	97,0633	0,7941	8181
3	103,1267	0,8419	8163
		Média	8170

Tabela 2.6 - Massas e concentrações folhas intermediárias coleta 2.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	93,1233	1,0517	11294
2	95,6367	1,0801	11294
3	80,6400	0,9103	11288
		Média	11292

Tabela 2.7 - Massas e concentrações folhas jovens coleta 2.

Amostra	Massa da mucilagem (g)	Massa seca (g)	Concentração (ppm)
1	108,1167	1,3783	12749
2	107,3200	1,3728	12791
3	102,0333	1,3000	12741
		Média	12760

Analisando as tabelas de massas e concentrações, é possível observar que na primeira coleta de folhas, realizada no mês de julho em período de inverno, as folhas intermediárias tiveram menor concentração comparada com folhas maduras. Já na segunda coleta, realizada no mês de outubro em período de primavera, ocorreu um efeito contrário em que folhas maduras tiveram menor concentração comparada com folhas intermediárias. Em ambos os períodos de coleta, folhas jovens atingiu concentração maior que as outras duas idades de folhas estudadas.

2.4 Descrição dos testes de ressonância magnética nuclear de prótons (RMN de ^1H)

Primeiramente, as amostras produzidas das diferentes idades da planta em estudo provenientes da segunda coleta, foram diluídas com água deionizada até alcançar a mesma concentração de 8000 ppm. O fato das amostras estarem na mesma concentração permite uma comparação mais confiável dos resultados posteriormente.

Foram inseridos 350 microlitros de mucilagem de cada idade de babosa estudada em três tubos pequenos (cada tubo para uma idade diferente) através de uma micropipeta. Após isso, foi adicionado em cada tubo 350 microlitros de água deuterada e então as amostras foram levadas ao equipamento de teste (espectrômetro) descrito no tópico 2.1.5. Foi feito um experimento de pré-saturação no sinal da água presente na babosa por meio de um pulso de saturação de 2 segundos, seguido pela aplicação de um pulso de 90° de 11,8 microsegundos e aquisição do FID (dados de decaimento do sinal elétrico livre de indução) durante 3,833 segundos. Os testes foram realizados para uma janela espectral de 6410,3 Hz, com aquisição de 128 *scans* com um tempo de relaxação de 2 segundos.

2.5 Descrição dos testes no reômetro

Nos experimentos conduzidos no reômetro (Figura 2.1) foi utilizada uma geometria rotativa composta por cilindros concêntricos de folga dupla (“*Standard Double Gap*”, Figura 2.6). A mesma possui grande área de contato, com isso é possível obter resultados com boa precisão para uma ampla faixa de número de Reynolds.

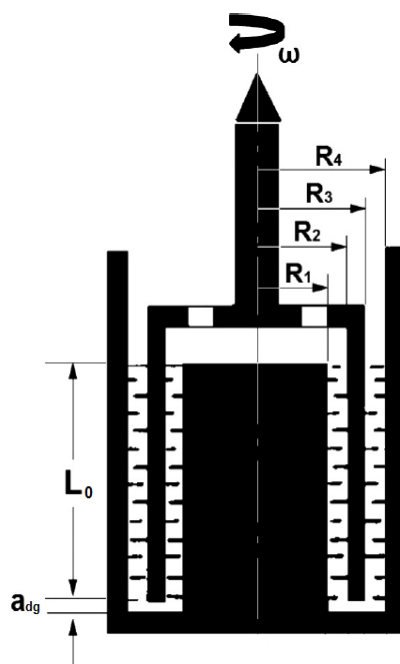


Figura 2.6 – Desenho esquemático da geometria *Double Gap*. Pereira, Andrade e Soares (2013).

Na referida geometria, a amostra é depositada entre duas superfícies rígidas, coaxiais e interconectadas, com simetria cilíndrica (copo). O rotor possui um tubo de paredes finas e coaxiais localizado entre as duas superfícies cilíndricas mencionadas, além de girar em torno do eixo de simetria do copo com uma determinada velocidade angular. Em relação às dimensões da geometria, seus raios são $R_1 = 17,75$ mm, $R_2 = 18,00$ mm, $R_3 = 21,40$ mm e $R_4 = 21,70$ mm. Outras duas dimensões importantes são o comprimento do rotor $L_0 = 55,00$ mm e a distância da extremidade do rotor ao fundo do copo $a_{dg} = 5,10$ mm. O volume total de amostra no interior do copo é de 6,30 ml.

A taxa de deformação média ($\dot{\gamma}$) é uma função da velocidade angular do rotor (ω) e do fator geométrico K , $\left(K = \frac{2R_4^2}{R_4^2 - R_3^2} = \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}\right)$, conforme Equação 4.

$$\dot{\gamma} = K\omega = K \frac{2\pi}{60} n. \quad (4)$$

Onde n é a rotação do rotor em rpm.

O torque medido no rotor é relacionado à tensão de cisalhamento nominal (τ), de acordo com a equação 5.

$$T_{dg} = \frac{4\tau\pi L (\delta^2 R_3^2 + R_2^2)}{1 + \delta^2}. \quad (5)$$

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

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (6)$$

O fator de atrito de Fanning (f) é definido segundo equação 7.

$$f = \frac{2\tau}{\rho u^2} = \frac{2\tau}{\rho(\omega\bar{R})}. \quad (7)$$

Onde u é a velocidade linear média e $\bar{R} = \frac{R_2 + R_3}{2}$.

O número de Reynolds é expresso como:

$$Re = \frac{\rho \bar{h} u}{\mu} = \frac{\rho \bar{h} (\omega \bar{R})}{\mu}. \quad (8)$$

Onde μ é a viscosidade cisalhante da solução polimérica, $\omega \bar{R}$ é a velocidade linear média e \bar{h} é o espaçamento médio entre as paredes do copo e do rotor, definido por

$$\bar{h} = \frac{(R2-R1)+(R4-R3)}{2}.$$

2.5.1 Preparo da solução polimérica

Primeiramente, antes de realizar os testes no reômetro, foi necessário seguir uma rotina cuidadosa de preparo das soluções de forma a garantir sua homogeneidade. Com base nisso, uma amostra de *aloe vera* foi descongelada a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C). Logo após, essa amostra foi diluída com solvente (água deionizada) até se alcançar uma concentração de 460 ppm, concentração dos primeiros testes no reômetro. A partir daí, a solução de teste foi colocada em um misturador eletro-magnético, já descrito no tópico 2.1.4, para determinar o tempo adequado de mistura para a completa homogeneização da amostra. Para verificar essa homogeneidade, foram feitos testes de viscosidade (descrito no tópico 2.5.2) com intervalos de 30 minutos a partir do momento em que a amostra foi colocada no misturador.

2.5.2 Testes de viscosidade

O referido teste foi feito utilizando uma geometria rotativa que contém cilindros concêntricos de dupla fenda (*Double Gap*), detalhada no tópico 2.5 e ilustrada pela Figura 2.6.

No teste de viscosidade, a velocidade angular do rotor varia de 0 a 3000 rotações por minuto (rpm) em 600 segundos, tempo em que os dados são obtidos linearmente a cada segundo. A medida de viscosidade da solução polimérica é observada na faixa de rotação do rotor em que o escoamento se encontra em regime laminar, especificamente são considerados os últimos valores de viscosidade

antes dos mesmos começarem a aumentar com o incremento da rotação (ponto de mínimo da curva de viscosidade – ver Figura 3.1), pois a partir desse momento ocorrem as primeiras instabilidades e o escoamento assume característica turbulenta. Em relação a esse fato, Pereira e Soares (2012) afirmaram que os resultados de viscosidade medidos nessa faixa de rotação estão de acordo com os obtidos em viscosímetros capilares. A temperatura para o teste de viscosidade foi controlada em 25°C, deste modo correspondendo à temperatura média dos testes de redução de arrasto realizados *a posteriori* no reômetro.

Outro teste de viscosidade, executado também com geometria de dupla folga, tem como objetivo verificar o comportamento reológico da mucilagem de babosa para cada idade de folha da planta estudada. O início do teste foi feito com a concentração natural da amostra encontrada após a produção da mucilagem (verificar tabelas 2.2, 2.3 e 2.4) e, a partir daí, diluiu-se a amostra para as concentrações de 3000, 1500, 500, 50 ppm. Um procedimento de agitação para homogeneização foi aplicado nas amostras após a diluição da solução concentrada antes de iniciar cada teste. O teste consiste em variar a taxa de deformação de 10^{-2} até 10^{-4} 1/s^{-1} por 600 segundos para cada concentração da solução. A aquisição dos dados foi feita na escala logarítmica e 600 pontos foram adquiridos.

2.5.3 Teste de redução de arrasto

Os testes de redução de arrasto foram conduzidos no reômetro com a mesma geometria utilizada nos testes de viscosidade e tem como objetivo avaliar o efeito da redução de arrasto ao longo do tempo para as concentrações de 460 e 200 ppm. A rotação do rotor foi mantida fixa em um determinado valor para manter o número de Reynolds em 1360 durante 2000 segundos. Foram medidos 2000 pontos durante esse tempo.

2.6 Descrição dos testes na bancada experimental

No aparato experimental de tubos utilizado nos testes de redução de arrasto, é depositado uma quantidade de água filtrada (solvente) no tanque de

armazenamento e em seguida é adicionado uma quantidade de mucilagem de *aloe vera* (material a ser estudado) até se alcançar a concentração de teste desejada. Como a mucilagem inicialmente está congelada, tal material é deixado em repouso no tanque de armazenamento juntamente com o solvente por 2 horas, tempo suficiente para que a mucilagem descongele e entre em equilíbrio térmico com o meio. Esse tempo foi determinado baseando-se no trabalho de Barbosa, Soares e Siqueira (2017). Os autores utilizaram 2 horas de repouso para a mucilagem de babosa. Na sequência, a solução é misturada suavemente por 5 minutos para total homogeneização. Após esses procedimentos, uma pequena quantidade de amostra é retirada para medir a viscosidade e o restante da solução é escoado lentamente por ação da gravidade até o vaso de pressão percorrendo uma tubulação de 1,5". Uma vez que toda solução se encontra no vaso de pressão, uma bomba centrífuga é acionada a uma vazão de 4,0 m³/h para impulsioná-la, assim promovendo seu escoamento através do circuito hidráulico de teste que tem 13,5 metros de comprimento. Em seguida, a solução é depositada novamente no tanque de armazenamento. Todos os testes são realizados a uma temperatura média de 25°C.

Os valores de vazão e pressão estática do escoamento nos diferentes pontos da seção de teste são computados simultaneamente por um supervisor desenvolvido na plataforma LabView. Esse supervisor está associado a uma placa de aquisição de dados NI – 6008 (fabricante National Instruments) capaz de realizar leituras em tempo real dos transdutores de pressão e medidor de vazão.

Quando toda amostra de teste, inicialmente no vaso de pressão, percorre a tubulação de teste e retorna para o tanque de armazenamento, um ciclo de leitura de dados é realizado. Em seguida, uma válvula do circuito é aberta permitindo que a solução polimérica, agora com moléculas parcialmente desagregadas (moléculas que sofreram quebra em suas ligações por forças intermoleculares), retorne novamente ao vaso de pressão por gravidade, deste modo completando um ciclo (também chamado de passe). Essa mesma solução é utilizada para os próximos ciclos até que não se observe mais variação de resultado devido ao efeito da desagregação, momento em que o teste é finalizado.

O valor do fator de atrito é calculado continuamente a cada passe até o final do teste, assim observando o aumento desse valor que é decorrente da desagregação

do polímero passe por passe. Dependendo da concentração polimérica da solução, são necessários 20, 30 ou 40 passes para alcançar o valor constante do fator de atrito, mantendo a vazão da bomba constante.

Conhecido os valores de massa específica (ρ), velocidade média do escoamento (\bar{u}), diâmetro interno da tubulação (D) e viscosidade dinâmica da solução (η), o número de Reynolds é expresso pela seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\eta}. \quad (9)$$

Levando em consideração a diferença de pressão, diâmetro constante e escoamento completamente desenvolvido na seção de teste, o fator de atrito de Darcy da bancada experimental é calculado pela equação 10.

$$f_D = \frac{2D}{\rho \bar{u}^2} \left(\frac{\Delta p}{l} \right). \quad (10)$$

O percentual de redução de arrasto (%DR) é calculado em função da relação entre os fatores de atrito da solução (f) e do solvente (f_0), conforme a seguinte Equação:

$$\%DR = (1 - f/f_0) \times 100. \quad (11)$$

Conforme o procedimento de teste na bancada experimental já descrito, realizou-se testes utilizando mucilagem de folhas de *aloe vera* jovens, intermediárias e maduras com o objetivo de avaliar a capacidade de redução de arrasto para uma mesma concentração do material na solução, pois assim foi possível comparar os resultados entre as diferentes idades da folha da planta. Com isso, as soluções foram preparadas no tanque de armazenamento com 200 ppm. Investigou-se nesse procedimento a influência da variação da idade da folha na capacidade em reduzir o arrasto. Além disso, analisou-se as variações de redução de arrasto máxima e mínima apresentada nos testes.

2.7 Critério estatístico para rejeição dos dados

Conforme já mencionado, os dados dos medidores de vazão e transdutores de pressão, coletados durante o escoamento da solução pelas tubulações do aparato experimental, são obtidos em tempo real e armazenados no programa LabView. A solução é deslocada do vaso de pressão até o tanque de armazenamento por volta de 60 segundos e durante esse tempo são adquiridos 60 dados, quantidade suficiente para a análise. Em meio à leitura dos valores de vazão e pressão, possíveis perturbações no processo podem gerar leituras anormais formando um conjunto de valores discrepantes e atípicos. A partir dos valores coletados de vazão e pressão, é tomado um valor médio para cada parâmetro, mas para que esse valor médio seja o mais representativo possível os dados atípicos precisam ser eliminados para não interferirem no resultado médio. Portanto, neste trabalho foi utilizado o critério estatístico de Chauvenet para rejeição dos valores atípicos, em que consiste em identificar valores discrepantes aos demais valores da mesma amostragem de dados.

A Tabela 2.8 apresenta valores determinados pelo critério de Chauvenet, os quais são referentes à razão entre o máximo desvio aceitável (d_{max}) e o desvio padrão (σ), para diferentes números de amostras (N).

Tabela 2.8 - 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 referido critério seja aplicado, primeiramente deve ser calculado a média e o desvio padrão dos valores de vazão e pressão, com isso é possível determinar o desvio pontual de cada valor do conjunto de dados. Em seguida, é feita a razão entre cada desvio pontual e o desvio padrão, que é comparada com o valor adequado na Tabela 2.8. Caso o valor absoluto dessa razão seja superior ao aceito pelo critério, o valor correspondente é descartado. Como a aquisição de dados neste trabalho é de aproximadamente 60 pontos por passe, a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão utilizada como critério é de 2,62. Após a eliminação dos dados atípicos, uma nova média e um novo desvio padrão são calculados.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DA MUCILAGEM

Neste capítulo são apresentados os testes realizados para caracterizar, de forma reológica e química, a mucilagem de folhas de babosa jovem, intermediária e madura. Primeiramente são apresentados os gráficos que mostram o comportamento reológico do fluido em questão, seguido pelos resultados obtidos na Ressonância Magnética Nuclear de Prótons que mostram a presença dos principais constituintes nas amostras de testes.

3.1 Comportamento reológico

Conforme explanado no tópico 2.5.2, foram conduzidos testes de viscosidade para verificar o comportamento reológico da mucilagem de babosa para cada idade de folha estudada, deste modo gerando gráficos de viscosidade em função da taxa de deformação ilustrados pelas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3. É importante ressaltar que cada curva dos gráficos possui repetibilidade, assim conferindo maior confiabilidade nos resultados.

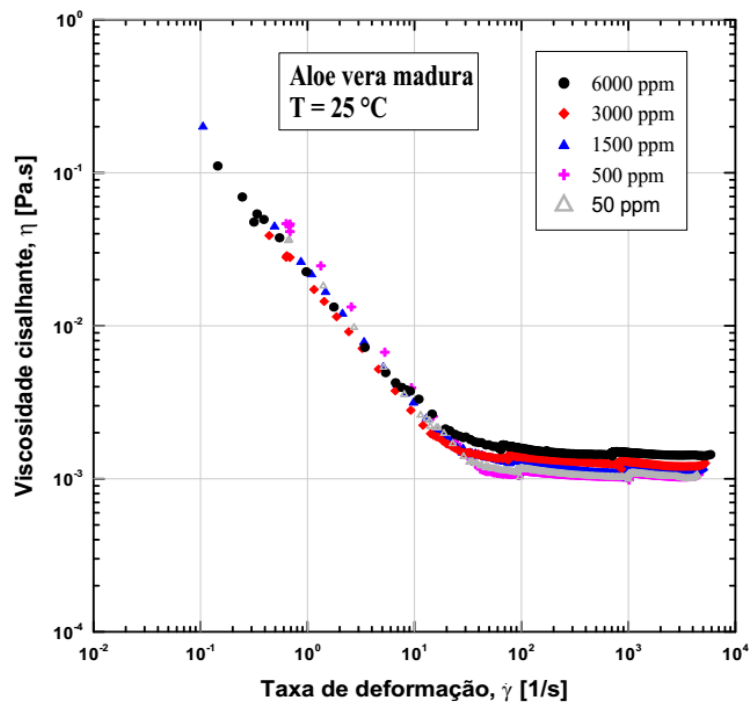


Figura 3.1 – Comportamento reológico das folhas maduras.

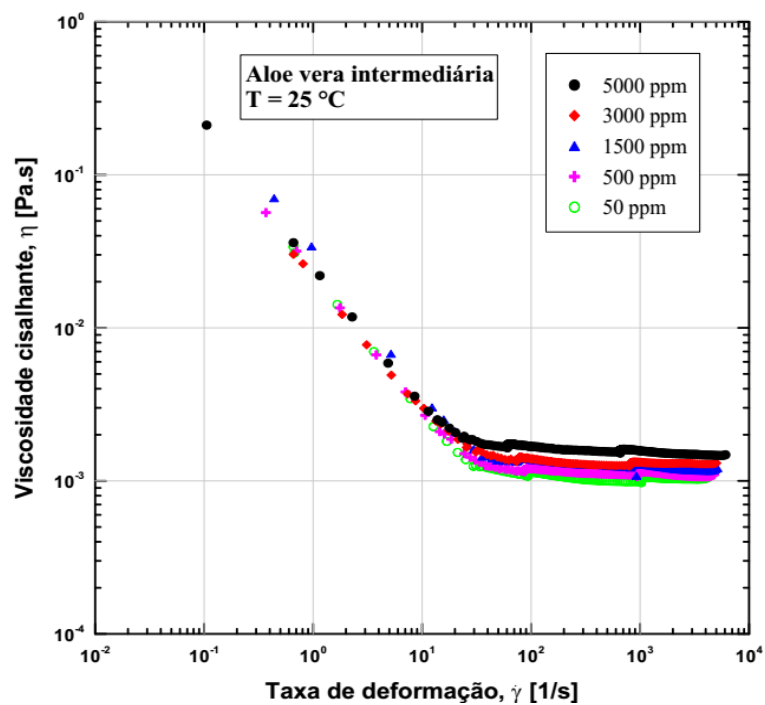


Figura 3.2 – Comportamento reológico das folhas intermediárias.

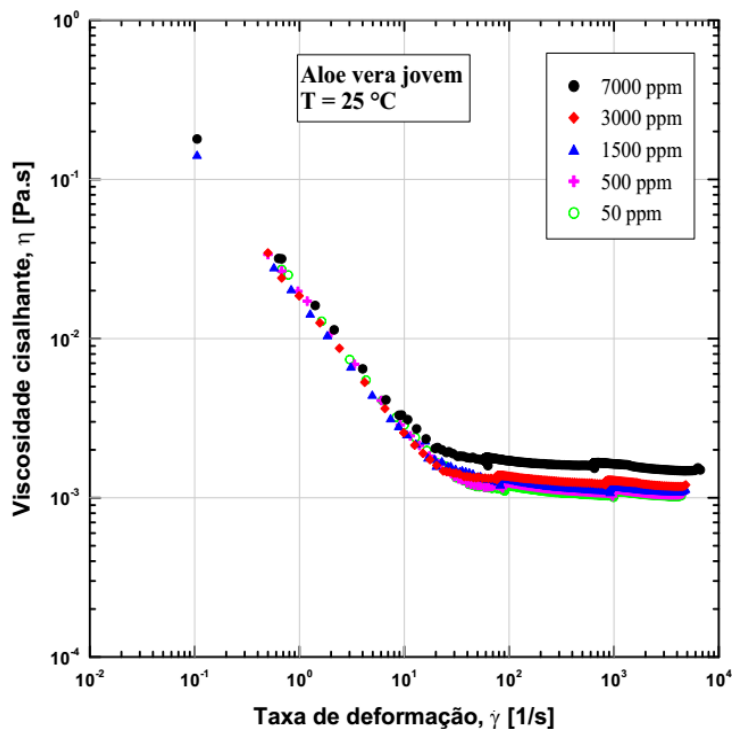


Figura 3.3 – Comportamento reológico das folhas jovens.

Analisando as Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, as curvas mostram que a mucilagem da babosa possui comportamento de fluido afinante em que a viscosidade é reduzida com o aumento da taxa de deformação até certo ponto, mesmo para a concentração mais baixa de 50 ppm. Observa-se que para todas as curvas das diferentes idades a viscosidade em altas taxas de deformação, η_{∞} , tende a ser constante e próxima a da água ($\eta = 10^{-3}$ Pa.s), no qual o fluido se comporta como se fosse newtoniano e é essa viscosidade utilizada na definição de Re e do fator de atrito.

3.2 Espectro de ressonância magnética nuclear de prótons (RMN de ^1H)

A partir de amostras de *aloe vera* com idades variadas, foram conduzidos testes de ressonância magnética nuclear, descrito na seção 2.4, para avaliar a composição química presente em cada idade e, com isso, estimar qual constituinte possivelmente atua mais fortemente no fenômeno de redução de arrasto. A Figura 3.4 ilustra o resultado do referido teste para as três idades de folha estudadas.

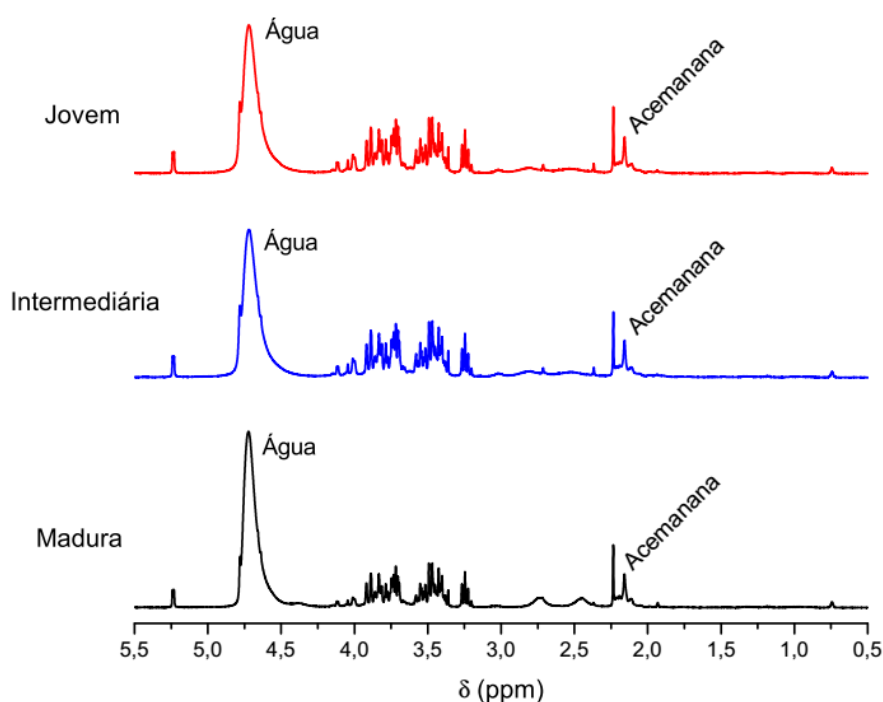


Figura 3.4 – Espectro RMN

Analisando a Figura 3.4, o pico de 2,15 ppm caracteriza o polissacarídeo acemanana, de acordo com Fuentes e outros (2017). Conforme já abordado, o polissacarídeo acemanana, destacado na referida figura, é um dos principais polissacarídeos presente no gel da babosa, fato reportado por Gowda e outros (1979) e Femenia e colaboradores (1999). Já o pico em 4,7 ppm caracteriza a água da mucilagem da babosa.

A Figura 3.5 apresenta o mesmo espectro, porém de forma mais detalhada, aplicando zoom na Figura 3.4. Com isso, é possível observar alguns outros constituintes que compõem a mucilagem de *aloe vera* de acordo com estudos de autores que realizaram o teste de ressonância magnética nuclear. Segundo Ray e Gupta (2013), o pico da glicose está localizado por volta de 5,2 ppm. Bozzi e outros (2007) relata que há presença de ácido málico em 2,8 ppm. O referido autor ainda relata a presença de ácido láctico no pico em 1,45 ppm. Há também presença de frutose relatado por Monakhova, Randel e Diehl, (2016) no pico em 4,1 ppm. Entre 3,2 e 4,1 ppm encontra-se um grupo de picos referentes aos polissacarídeos presentes na amostra, segundo Diehl (2008). Edwards (2012) relata a presença de ácido cítrico por volta de 3 ppm, ácido succínico em 2,5 ppm, ácido pirúvico em 2,35

ppm e ácido acético em 1,92 ppm. Por fim, o pico em 0,75 ppm caracteriza etanol, de acordo com Diehl (2008).

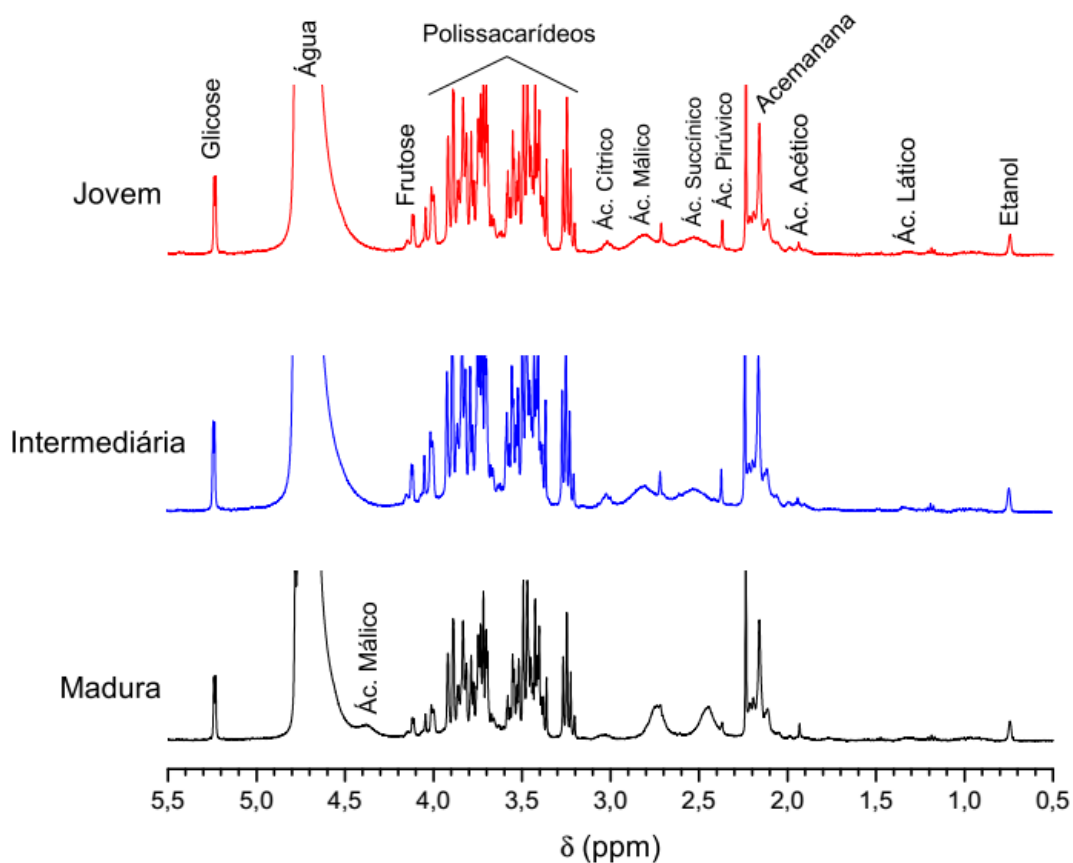


Figura 3.5 – Espectro RMN focalizado.

Para realizar uma análise proporcional dos principais constituintes, foi feito o procedimento de integrar cada pico caracterizado a fim de conhecer suas respectivas áreas. Com isso, calcula-se a área total dos picos e, posteriormente, a proporção da área de cada pico com a área total calculada. É importante ressaltar que tal método não demonstra exatamente a porcentagem de cada componente químico presente na mucilagem, porém permite fazer a comparação entre picos semelhantes dentre os espectros estudados e analisar se os constituintes encontram-se em maior ou menor quantidade nos tipos de folhas comparados. A tabela abaixo apresenta os componentes que foram caracterizados e suas respectivas proporções.

Tabela 3.1 – Proporção dos principais constituintes da mucilagem de *aloe vera*.

Tipo de Folha	Polissacarídeos	Acemanana	Ác. Cítrico	Ác. Málico	Ác. Succínico	Ác. Pirúvico	Ác. Acético	Ác. Lático	Etanol
Jovem	75,1%	11,7%	1,9%	4,3%	4,6%	0,9%	0,5%	0,4%	0,6%
Intermediária	74,9%	11,7%	1,9%	4,4%	4,9%	0,9%	0,5%	0,3%	0,6%
Madura	64,8%	13,4%	1,3%	11,2%	6,5%	0,9%	0,5%	0,6%	0,7%

Observando a referida tabela, abordando sobre a proporção de polissacarídeos (glicomanana, celulose e pectina), é evidente que mucilagem de folhas jovens e intermediárias possuem tal constituinte de forma semelhante e em maior proporção comparado com folhas maduras. Essa observação é muito importante, pois de acordo com Bourbon e outros (2010) e Pandley e Singh (2016), o polissacarídeo é o componente que tende a fornecer viscoelasticidade às mucilagens, o que é fundamental para ocorrer a redução de arrasto. De forma específica, o polissacarídeo acemanana é encontrado de modo semelhante em folhas jovens e intermediárias, porém em folhas maduras tal componente se encontra em patamar pouco maior. Abordando sobre o ácido málico e ácido succínico, praticamente não houve diferença entre a mucilagem de folhas jovens e intermediárias, mas em folhas maduras se encontra em destaque. Um ponto importante a ser abordado é que pode haver algum composto que amenize o efeito de redução de arrasto, pois folhas maduras possuem ácido málico e succínico em níveis maiores e redução de arrasto em patamar menor. Tratando-se do ácido pirúvico, não houve alteração entre as folhas estudadas. O ácido cítrico está em quantidades semelhantes nas folhas jovens e intermediárias, porém em menor proporção em folhas maduras. Já o ácido acético e o etanol praticamente não tiveram diferença entre as folhas estudadas. Sobre o ácido lático, encontra-se em maior quantidade em folhas maduras, justificando o nível menor de polissacarídeos nesse tipo de folha, já que o referido ácido é produto da degradação do polissacarídeo.

Um fator relevante a ser estudado em trabalhos posteriores é que os polissacarídeos glicomanana, celulose e pectina podem ser analisados de forma individual nos testes de redução de arrasto. Acredita-se que, além de analisar tais constituintes de

forma individual, a combinação entre eles juntamente com a acemanana pode também produzir algum efeito que promova a redução de arrasto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos dois aparatos experimentais utilizados nos testes, reômetro e bancada. Primeiramente são descritos os resultados preliminares, seguidos pelos resultados obtidos em testes de redução de arrasto utilizando mucilagens de *aloe vera* jovem, intermediária e madura, análise química dos constituintes presentes em cada idade da planta estudada e, por fim, comparação entre diferentes materiais redutores de arrasto.

4.1 Resultado preliminar reômetro

Conforme descrito no tópico 2.5.1, para verificar a homogeneidade da amostra de babosa utilizada em testes no reômetro, foram feitas curvas de viscosidade com intervalos de 30 minutos a partir do momento em que a amostra foi colocada no misturador eletro-magnético. As curvas são ilustradas pela Figura 4.1.

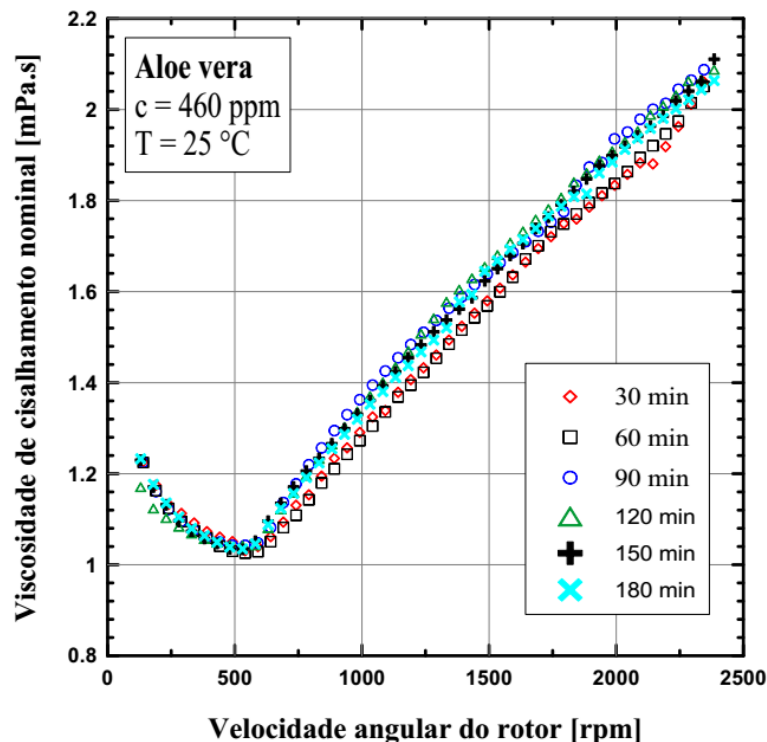


Figura 4.1 – Tempo necessário para total mistura da amostra em água deionizada.

Analisando a Figura 3.1, apesar dos valores de viscosidade serem semelhantes no regime laminar, na região turbulenta eles apresentam certa variação para os tempos de 30 e 60 minutos (curvas inferiores). Para o tempo de 90 minutos, a curva ainda apresenta alguma variação na região de instabilidade. Portanto, usou-se o tempo de 120 minutos como o adequado para a total mistura da amostra, já que a partir desse tempo as curvas não sofreram alteração.

4.2 Influência das diferentes idades de folha de *aloe vera* em testes de redução de arrasto no reômetro

Os testes realizados no reômetro para analisar o efeito da variação da idade da folha de babosa na redução de arrasto seguiram o procedimento descrito na seção 2.5, no qual é utilizada a geometria *Double Gap* para avaliar a capacidade da mucilagem de babosa em reduzir arrasto ao longo do tempo. Os testes foram feitos a uma temperatura média 25°C utilizando concentrações de 460 e 200 ppm para as folhas maduras, intermediárias e jovens da planta, mantendo o número de Reynolds em 1360. É importante ressaltar que cada curva apresentada no gráfico é uma média de

três curvas repetitivas. Primeiramente, tratando-se dos testes realizados a 460 ppm, os resultados são ilustrados pela Figura 4.2.

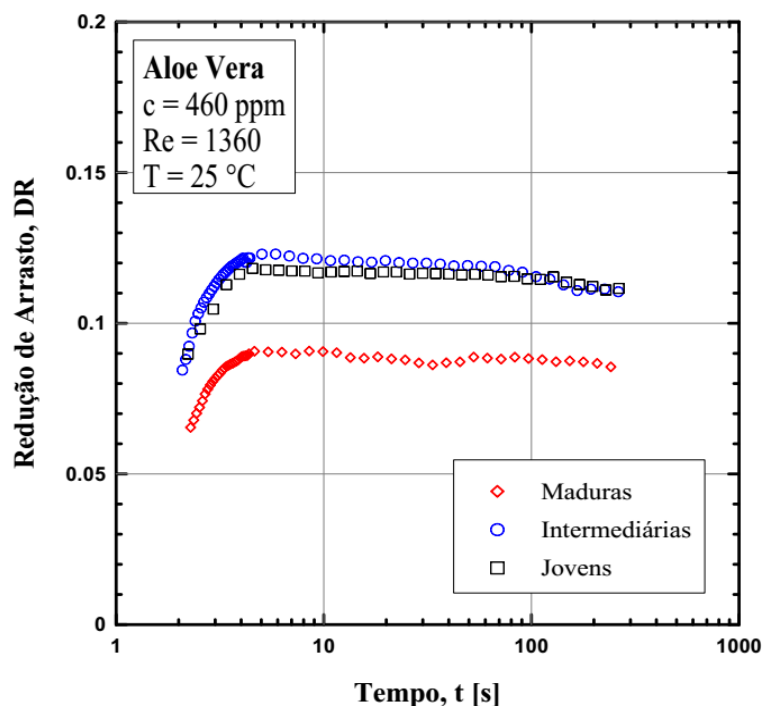


Figura 4.2 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do tempo a 460 ppm.

É possível observar na Figura 4.2 o final do tempo de desenvolvimento da curva de redução de arrasto, etapa que caracteriza o crescimento de DR com o tempo. Após o tempo de desenvolvimento, DR atinge seu valor máximo, mantendo-se constante a partir desse ponto, comportamento esse característico de polímeros rígidos. O referido tempo de desenvolvimento foi observado por Pereira e Soares (2012) em seus estudos com óxido de polietileno (PEO). Ainda sobre a Figura 4.2, as amostras com folhas jovens e intermediárias alcançaram um DR máximo em torno de 12% com assíntota por volta de 11%. Já os testes com folhas maduras tiveram um valor de 9% de forma constante.

É importante ressaltar que o resultado apresentado demonstra que mucilagem de folhas de *aloe vera* com idades variadas têm eficiências diferentes no que tange a reduzir o arrasto. Para folhas jovens e intermediárias, a eficiência foi praticamente a mesma. Já as folhas maduras possuem menor poder de redução de arrasto. Essa comparação pode ser feita pelo fato dos testes serem conduzidos a mesma concentração e número de Reynolds. Para verificar a repetibilidade de tal efeito, o

teste de redução de arrasto foi feito novamente, agora para 200 ppm, como ilustrado na Figura 4.3.

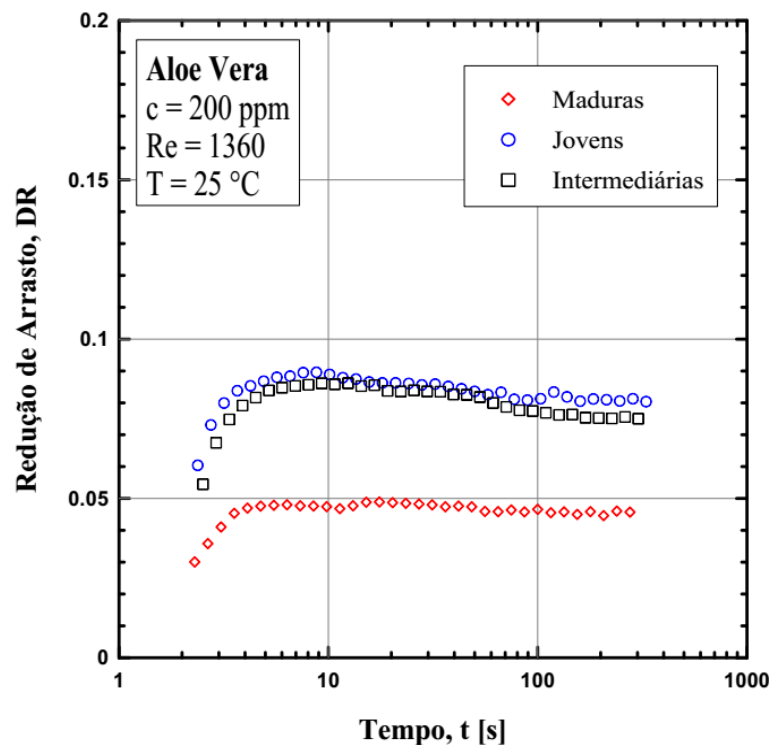


Figura 4.3 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do tempo a 200 ppm.

De acordo com a Figura 4.3, as amostras com folhas jovens e intermediárias tiveram um valor máximo de DR em torno de 9% com assíntota em 8%. Já os testes com folhas maduras alcançaram um valor constante de aproximadamente 5%. Com isso, é possível perceber que o efeito da variação da idade da folha na redução de arrasto se manteve para a concentração de 200 ppm, pois folhas jovens e intermediárias tiveram praticamente a mesma eficiência. Já as folhas maduras tiveram patamar de eficiência menor. Esse fato também foi verificado nos testes com 460 ppm.

Com o intuito de estudar mais detalhadamente a eficiência de cada idade de folha para reduzir o arrasto em testes com níveis de turbulência maiores, tal experimento também foi conduzido em uma bancada experimental, apresentada na seção 2.1.2.

4.3 Resultados preliminares bancada experimental

A fim de avaliar a confiabilidade da bancada para a realização dos experimentos, foi realizado um teste com o propósito de validar a bancada. O referido teste consiste em utilizar 100 litros de água filtrada e a cada passe é imposto uma vazão diferente na bomba. Tal procedimento corresponde a variação do número de Reynolds de aproximadamente 67000 até 101000, faixa na qual os experimentos de redução de arrasto com as soluções de babosa foram realizados posteriormente.

Após a realização do teste de validação, o fator de atrito de Darcy (equação 10) foi calculado e analisado em função do número de Reynolds, como mostra a Figura 4.4.

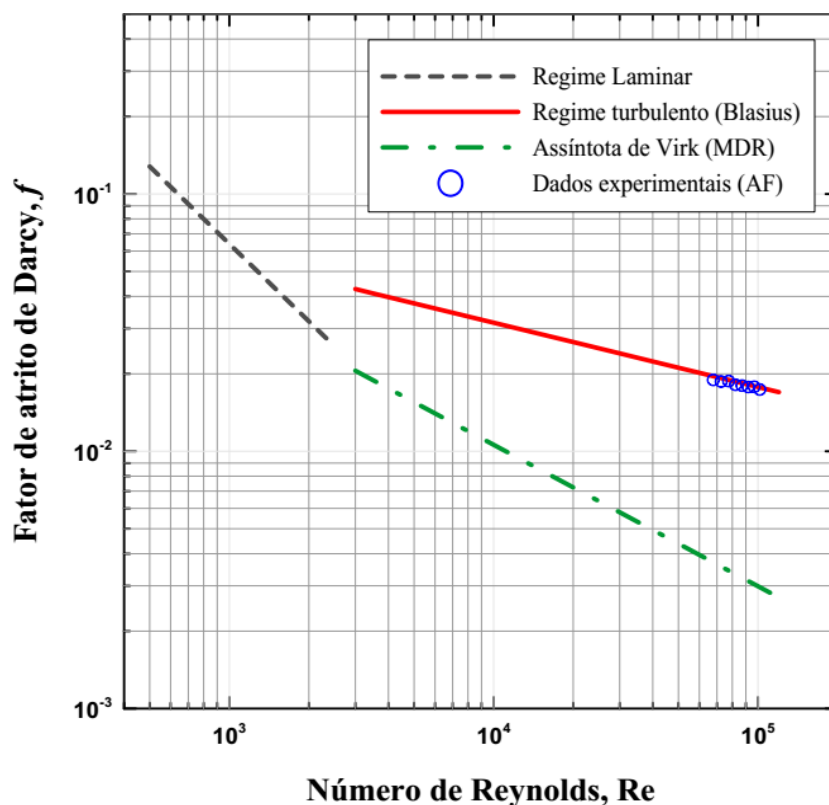


Figura 4.4 – Teste de validação da bancada experimental.

Observando a Figura 4.4, a linha preta tracejada representa o fator de atrito para escoamento em regime laminar ($f = 64/Re$), enquanto que a linha contínua vermelha representa o fator de atrito em escoamento turbulento de água em tubo liso obtido pela correlação de Blasius ($f_{blasius} = 0,316 * Re^{-0.25}$). A linha verde, traço e ponto, representa a assíntota de Máxima Redução de Arrasto (MDR), chamada de

lei de Virk ($f_{virk} = 1,68 * Re^{-0.55}$). Já os círculos azuis representam os dados do fator de atrito de Darcy obtidos para o escoamento de água filtrada, os quais estão muito próximos aos valores teóricos da correlação de Blasius, ambos apresentando uma diferença máxima de aproximadamente 3%. Esse nível de erro é aceitável para os fins deste trabalho.

Como já mencionado, a seção de teste (trecho em que os transdutores de pressão estão instalados) é composta por um tubo de aço inoxidável com tratamento interno de brunimento, portanto com baixa rugosidade e, com isso, o escoamento pode ser considerado como se fosse em tubo liso, permitindo comparar os resultados experimentais com a correlação de Blasius. Por mais que os valores experimentais com água filtrada estejam próximos aos teóricos, uma expressão do fator de atrito foi estimada em função do número de Reynolds obtidos a partir dos dados experimentais adquiridos com água filtrada. Tal expressão é apresentada pela Equação 12.

$$f_{bancada} = 0,1656 * Re^{-0,195}. \quad (12)$$

4.4 Influência das diferentes idades de folha de *aloe vera* na redução de arrasto na bancada experimental

Os testes realizados na bancada experimental, para analisar o efeito da variação da idade da folha de babosa na redução de arrasto, seguiram o procedimento descrito na seção 2.6.1. Foi realizado teste de repetibilidade de cada curva, no qual a solução é impulsionada por uma bomba centrífuga com vazão constante de 4 m³/h através da bancada experimental por 30 passes. Os experimentos foram feitos utilizando uma única concentração (200 ppm) para as folhas maduras, intermediárias e jovens da planta. Os resultados são apresentados na Figura 4.5.

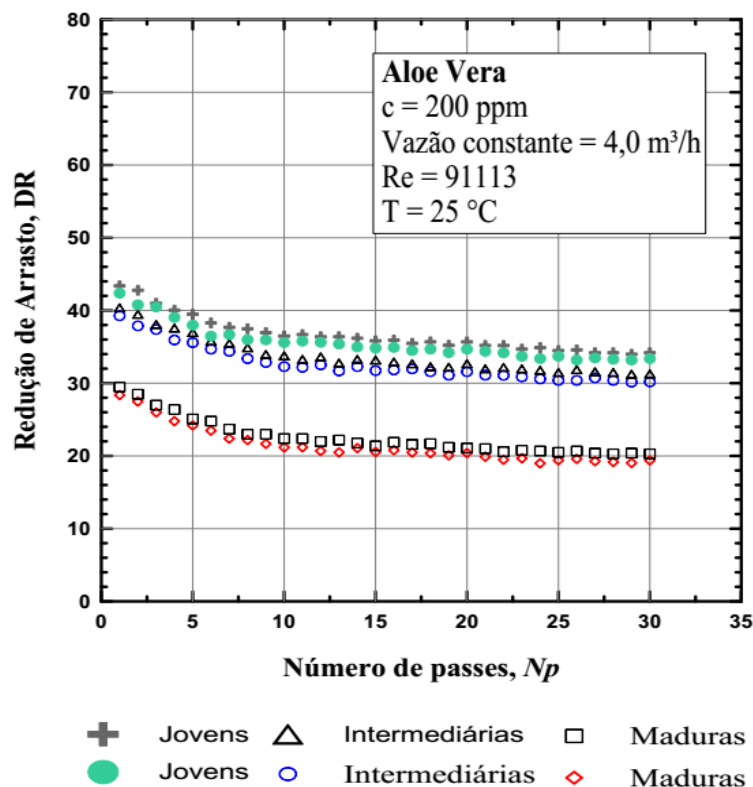


Figura 4.5 – Efeito da idade da folha na redução de arrasto em função do número de passes.

De acordo com a Figura 4.5, as curvas de folhas jovens, intermediárias e maduras alcançaram valor máximo de DR de 43%, 40% e 29%, respectivamente. Se tratando das assíntotas de cada curva, folhas jovens, intermediárias e maduras tiveram valores de DR de 34%, 31% e 20%, respectivamente. A partir dos resultados apresentados, verifica-se que as três idades de folhas da planta alcançam um valor máximo de redução de arrasto ($DR_{m\acute{a}x}$) no primeiro passe e diminui com o número de passes até atingir um valor assintótico (DR_{assint}). Isso ocorre devido à desagregação dos polímeros existentes na mucilagem de *aloe vera* durante o escoamento promovido pela bomba. Tal mucilagem, assim como a Goma Xantana, Goma Guar e o pó extraído do quiabo, se comporta como material rígido não degradando mecanicamente. Deste modo, acredita-se que a perda de eficiência ($DR_{m\acute{a}x}$ para DR_{assint}) da mucilagem proveniente da babosa é causada pela desagregação e não pela degradação das moléculas, fato já reportado por Soares *et al.* (2015) em seus estudos com Goma Xantana. 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.

Ainda sobre a Figura 4.5, um fato muito relevante é a confirmação dos resultados obtidos no reômetro em relação à constatação de que folhas de *aloe vera* com idades variadas reduzem arrasto com eficiências diferentes para uma mesma concentração de teste, no caso da bancada, 200 ppm. Na figura referida é possível observar que a eficiência em reduzir arrasto diminui à medida que a folha da planta se torna mais adulta (madura), ou seja, as folhas jovens e intermediárias apresentam comportamento redutor de arrasto mais intenso que as folhas maduras. Acredita-se que a composição química de cada idade de folha pode ser um fator importante para explicar tal efeito, já que os testes, tanto no reômetro quanto na bancada experimental, foram conduzidos à mesma concentração. Devido ao fato de que a composição química pode ser determinante, é fundamental conhecer os constituintes das mucilagens. Com isso, foi feito testes de ressonância magnética nuclear para analisar os constituintes presentes em cada idade de folha da planta estudada. Tal análise foi apresentada no tópico 3.2.

4.5 Comparação entre diferentes agentes redutores de arrasto na bancada experimental

Nesta seção, a capacidade de redução de arrasto da mucilagem proveniente da folha de *aloe vera* de diferentes idades é comparada com outros polímeros naturais, como o pó de quiabo e a Goma Xantana, estudados por Coelho e colaboradores (2016), e a própria mucilagem de babosa, mas preparada com folhas de idades aleatórias conforme estudado por Barbosa, Soares e Siqueira (2017). Todos os testes foram feitos na mesma bancada e seguiram o mesmo procedimento.

Primeiramente, a comparação entre mucilagens de folhas de babosa com idades pré-determinadas e a mucilagem preparada com folhas aleatórias é fundamental para validar os resultados obtidos nesse trabalho. Tal comparação é ilustrada na Figura 4.6. É importante destacar que os testes desta pesquisa foram feitos a vazão constante de 4m³/h na bomba mantendo o número de Reynolds em 91113. Já os

experimentos de Barbosa, Soares e Siqueira (2017) foram feitos com rotação constante de 3000 rpm na bomba e, com isso, o número de Reynolds variou na faixa de 56000 até 93000. A comparação dos resultados é válida porque o valor de Reynolds mantido nesta pesquisa de 91113 está dentro da faixa trabalhada por Barbosa, Soares e Siqueira (2017). Além disso, foi utilizado a mesma bancada experimental e um dos testes realizados pelos referidos autores foi feito com a mesma concentração de teste do presente estudo.

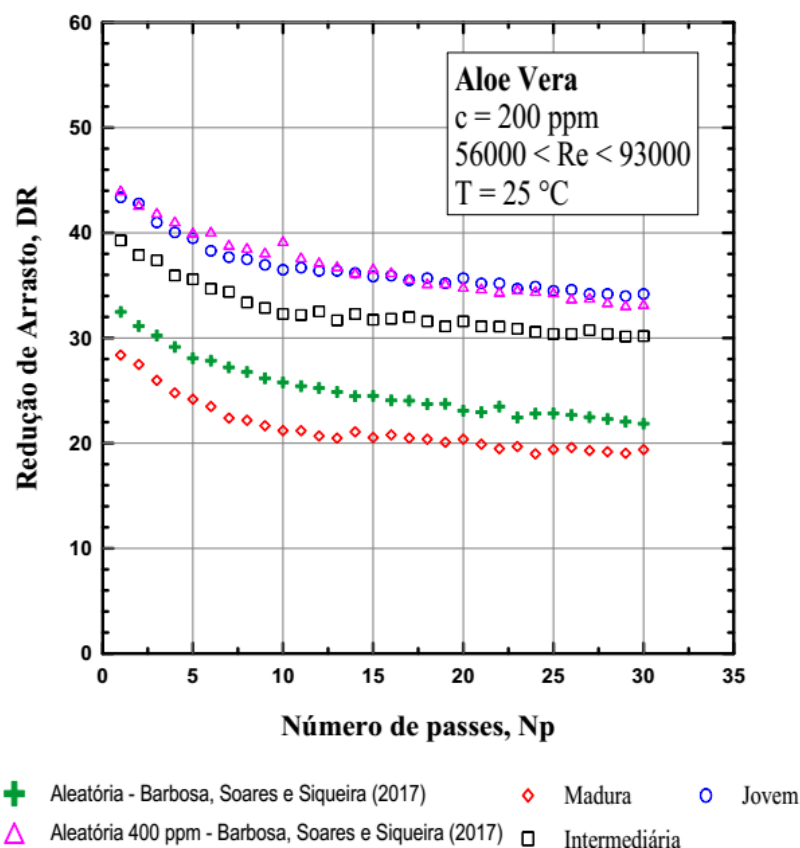


Figura 4.6 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e idades aleatórias

De acordo com a Figura 4.6, folhas aleatórias à 200 ppm tiveram um valor máximo de DR em torno de 32 % com assíntota em 22%. Já para 400 ppm, tais folhas tiveram redução de arrasto máxima de 44% com assíntota em aproximadamente 33 %. Com isso, é possível observar que há variação dos resultados entre os estudos comparados. A curva de concentração 200 ppm de folhas aleatórias teve eficiência maior do que folhas maduras e menor do que folhas intermediárias e jovens. Acredita-se que Barbosa, Soares e Siqueira (2017) tenham utilizado em seus

experimentos uma quantidade maior de folhas maduras, pois a curva de folhas aleatórias ficou mais próxima da curva de folhas maduras comparando com intermediárias e jovens. Outro ponto importante a ser analisado é que a curva de folhas jovens a 200 ppm tem comportamento muito semelhante a curva de folhas aleatórias a 400 ppm e, não distante, observa-se a curva de folhas intermediárias.

Ainda sobre comparação entre mucilagens de *aloe vera*, Abdulbari, Letchmanan e Yunus (2011) alcançaram uma redução máxima de aproximadamente 27% com uma concentração de 200 ppm de mucilagem de babosa sem separar as folhas por idade, Reynolds de 38642 e diâmetro interno da tubulação de 0,0254 metros. Tal valor de redução localiza-se abaixo dos resultados obtidos no presente trabalho para as idades de folhas estudadas e também para as folhas aleatórias utilizadas por Barbosa, Soares e Siqueira (2017).

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 e colaboradores (2016). Tais autores utilizaram os mesmos parâmetros de teste encontrados nos estudos de Barbosa, Soares e Siqueira (2017), ou seja, rotação constante de 3000 rpm na bomba e número de Reynolds variando entre 56000 e 93000. A Figura 4.7 apresenta a comparação dos resultados de mucilagem de babosa com idades diferentes e pó de quiabo.

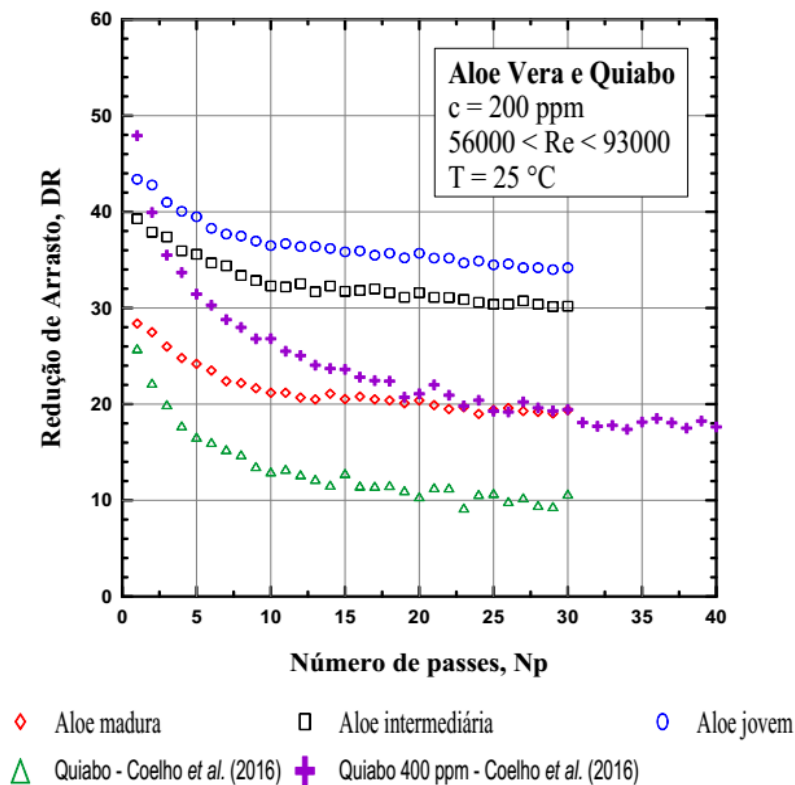


Figura 4.7 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e pó de quiabo.

De acordo com a Figura 4.7, o teste com pó de quiabo à 200 ppm teve um valor máximo de DR em torno de 26 % com assíntota em 10%. Já para 400 ppm, tal biopolímero teve redução de arrasto máxima de 48% com assíntota em aproximadamente 18 %. Com isso, é possível observar que para a concentração de 200 ppm, o resultado obtido com as idades estudadas de mucilagem de *aloe vera* é superior ao do pó do quiabo. Percebe-se ainda que a curva de pó de quiabo para 400 ppm alcança um valor maior de $DR_{máx}$ somente no primeiro ponto em comparação com a solução de babosa à 200 ppm utilizando folhas jovens. Tratando-se da parte assintótica da curva, a amostra de folhas jovens e intermediárias à 200 ppm são mais eficientes do que o pó de quiabo à 400 ppm. Já o valor de DR_{assint} da amostra de folhas maduras à 200 ppm ficou próximo do encontrado com a amostra de quiabo à 400 ppm. Barbosa, Soares e Siqueira (2017) reportaram esse fato utilizando folhas de idades aleatórias de babosa, em que constataram que para as concentrações de 100 e 200 ppm, o valor de $DR_{máx}$ da mucilagem de *aloe vera* foi superior ao apresentado pelo pó de quiabo. Os autores ainda relatam que essa diferença diminui à medida que a concentração é incrementada e, a partir da

concentração de 400 ppm, o valor de $DR_{m\acute{a}x}$ do pó de quiabo passa a ser maior que o obtido pela mucilagem de *aloe vera*. Porém, mesmo que o valor de $DR_{m\acute{a}x}$ do pó de quiabo seja maior a partir de 400 ppm, a parte assintótica da curva possui valor de redução de arrasto menor comparado ao valor de DR_{assint} da mucilagem de *aloe vera* utilizada por Barbosa, Soares e Siqueira (2017).

Outra análise relevante na Figura 4.7 está relacionada à perda de eficiência do material. É possível observar, para curvas de mesma concentração (200 ppm), que a perda de eficiência é muito menor para a mucilagem de babosa do que para o pó de quiabo. Para a referida concentração, a curva de *aloe vera* com idades diferentes possui uma queda percentual $((DR_{m\acute{a}x} - DR_{assint})/DR_{m\acute{a}x})$ de 32% (folhas maduras), 23% (folhas intermediárias) e 18% (folhas jovens). Já para a mesma concentração (200 ppm), a curva de pó de quiabo tem uma queda percentual de 61%. Isso indica que a mucilagem é menos sensível ao mecanismo de desagregação comparado ao pó de quiabo, ou seja, mais resistente às tensões cisalhantes provenientes do escoamento e ação da bomba.

Na sequência é feita uma comparação entre os resultados de redução de arrasto da amostra de *aloe vera* com diferentes idades e Goma Xantana, esta última obtido por Coelho e colaboradores (2016). Tal comparação é ilustrada pela Figura 4.8 em função do número de passes, em que os parâmetros de teste na bancada para a Goma Xantana seguiram uma rotação de 3000 rpm e um intervalo de Reynolds entre 61000 e 106000.

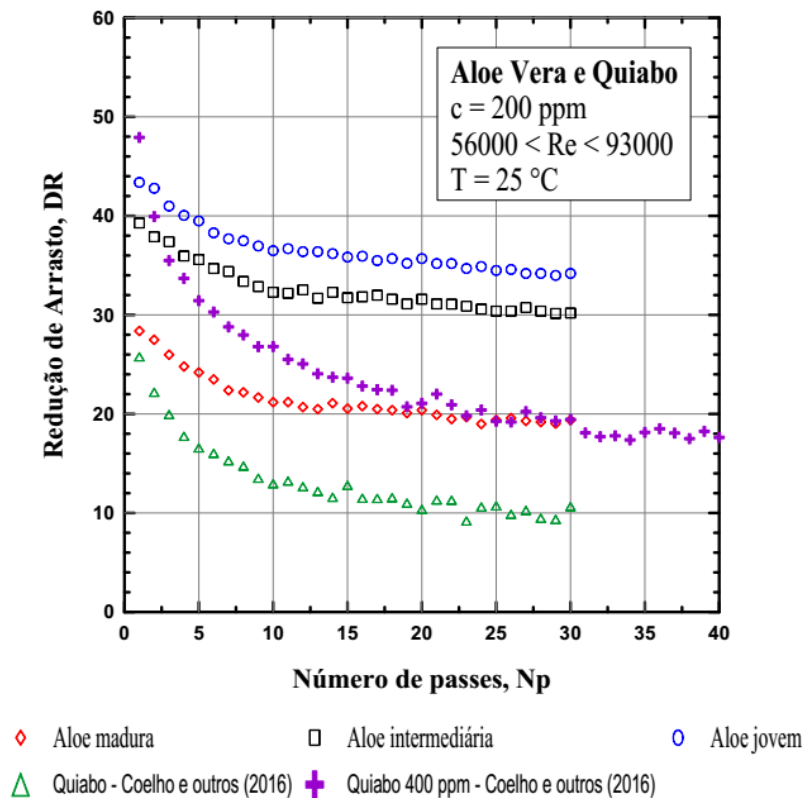


Figura 4.8 – Comparação entre mucilagens de folhas com idades pré-estabelecidas e Goma Xantana.

Analisando a referida figura, é possível observar que para a concentração de 200 ppm a curva de Goma Xantana possui eficiência maior que todas as curvas de *aloe vera* e que a curva da folha jovem de babosa foi a que alcançou eficiência mais próxima comparada com a XG. O valor de $DR_{máx}$ para 100 ppm de XG é o mesmo para 200 ppm de folhas intermediárias de *aloe vera*, em que a assíntota dessa concentração de XG se aproxima da assíntota de folhas maduras da planta estudada. Vale ressaltar que, apesar de apresentarem resultados de redução de arrasto inferiores à XG, a obtenção da mucilagem de *aloe vera* possui certa facilidade, já que tal planta é encontrada em diversas regiões e é processada sem uso de processos químicos como ocorre com a Goma Xantana.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados principais no reômetro mostram que a eficiência para reduzir o arrasto é diferente quando se utiliza mucilagens da planta estudada com idades variadas. Analisando as curvas na mesma concentração de teste, mucilagens de folhas jovens e intermediárias possuem eficiência maior comparadas com amostra de folhas maduras na redução do arrasto. Outro ponto importante a ser abordado, agora analisando separadamente cada curva em todas as concentrações de teste, é que verifica-se que os valores de DR não variam consideravelmente com o tempo, indicando baixa perda de eficiência.

Para confirmar o efeito de que folhas de babosa com idades variadas possuem eficiências diferentes para reduzir o arrasto, os testes foram conduzidos também na bancada experimental a 200 ppm, em que tal efeito também foi constatado. Como resultado obtido, as curvas de folhas jovens, intermediárias e maduras alcançaram valor máximo de DR de 43%, 40% e 29%, respectivamente. Tratando-se das assíntotas de cada curva, folhas jovens, intermediárias e maduras tiveram valores de DR de 34%, 31% e 20%, respectivamente.

Tanto os testes no reômetro, quanto os testes na bancada experimental, constataram que a mucilagem de folhas mais novas da planta em estudo possui uma redução de arrasto mais eficiente comparado com a mucilagem de folhas mais velhas. Com o objetivo de estimar quais constituintes possivelmente atuam mais fortemente na redução de arrasto, foram feitos testes de ressonância magnética nuclear nas amostras de cada idade da folha. Através do referido teste, foi possível observar que um dos componentes potencialmente redutores de arrasto é o polissacarídeo, já que é o constituinte que tende a fornecer viscoelasticidade às mucilagens e possui proporção semelhante entre folhas jovens e intermediárias por

volta de 75%, deste modo podendo haver relação com o efeito observado nos testes de redução de arrasto em que tais idades de folhas também tiveram resultados semelhantes.

Um ponto importante a ser estudado é analisar os polissacarídeos glicomanana, celulose e pectina de forma individual no experimento de redução de arrasto. Acredita-se que, além de analisar os constituintes de forma individual, a combinação entre eles também possa promover a redução de arrasto. Com isso, uma combinação interessante de componentes é entre os próprios polissacarídeos presente no gel da babosa (glicomanana, celulose, pectina e acemanana). As semelhanças entre os resultados na redução do arrasto e nas proporções dos constituintes de mucilagens com idades pré-determinadas observadas na Tabela 3.1, seja analisadas de forma individual (acemanana e ácidos) ou misturada (polissacarídeos), potencialmente podem ter alguma relação e isso é um forte indício de que dentre os constituintes estudados possa haver algum (s) que atue (m) de forma mais intensa no fenômeno de redução de arrasto.

Foram feitas também análises comparativas entre a mucilagem de *aloe vera* e outros DRA naturais. Primeiramente, a mucilagem com idades pré-determinadas foi comparada com a mucilagem proveniente de folhas com idades aleatórias estudadas por Barbosa, Soares e Siqueira (2017). A análise mostrou que a mucilagem de folhas jovens e intermediárias é mais eficiente que amostras de folhas aleatórias, sendo esta última mais eficiente que folhas maduras. Uma constatação relevante é que a mucilagem de folhas jovens a 200 ppm possui praticamente a mesma eficiência que a mucilagem de folhas aleatórias a 400 ppm, o que significa que tanto variar as idades das folhas de *aloe vera* quanto misturar as idades (folhas aleatórias) podem acarretar na alteração da eficiência da mucilagem de teste. A respeito da comparação a 200 ppm entre mucilagem de idades pré-determinadas e o pó de quiabo, este último estudado por Coelho e outros (2016), a curva do quiabo possui eficiência menor do que todas as curvas de idades de folha de babosa estudadas, se tratando do decaimento da curva ao longo do tempo. É importante ressaltar que a curva de quiabo a 400 ppm possui um valor máximo de *DR* maior somente no primeiro ponto de teste comparado às curvas de 200 ppm de *aloe vera*, além da assíntota da referida curva de quiabo se aproximar do valor assintótico de

folhas maduras a 200 ppm. Outra comparação realizada foi entre a mucilagem de idades pré-determinadas de babosa e a Goma Xantana, este último estudado por Coelho e outros (2016). A curva de XG a 100 ppm tem eficiência semelhante no valor máximo de DR com a curva de folhas intermediárias (200 ppm) e valores assintóticos próximos aos da curva de folhas maduras (200 ppm). Já a curva de XG à 200 ppm tem eficiência maior do que todas as curvas das idades de *aloe vera* também a 200 ppm.

A planta *aloe vera* apresenta algumas vantagens em relação a outros materiais naturais, como a Goma Xantana. Dentre essas vantagens é possível citar a simples aquisição das folhas, matéria prima abundante, mucilagem produzida sem processos químicos. Por ser natural e atóxica, tal mucilagem da babosa pode ser utilizada em aplicações que envolvem meio ambiente e medicina.

Apesar dos relevantes resultados, a mucilagem de *aloe vera* como DRA ainda precisa ser estudada mais detalhadamente. Como trabalho futuro, sugere-se extrair os constituintes químicos da mucilagem que potencialmente podem atuar mais intensamente na redução do arrasto. Além disso, utilizar tais constituintes extraídos, de forma individual ou combinadas, em testes para avaliar qual é a eficiência de cada um, ou de cada combinação, para reduzir o arrasto.

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] Bailey, B. A., Strem, M. D., Bae, H., de Mayolo, G. A. e Guiltinan, M. J. “Gene expression in leaves of *Theobroma cacao* in response to mechanical wounding, ethylene, and/or methyl jasmonate”, *Plant Science*, vol. 168, pp. 1247-1258, 2005.
- [8] Barbosa, K. C. O., Soares, E. J. e Siqueira, R. N. “Estudo da mucilagem e fibra natural da babosa (*aloe vera*) como redutores de arrasto em escoamentos

- turbulentos”, 2017, Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Espírito Santo.
- [9] 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.
- [10] Bewersdorff, H. W. e Singh, R. P. “Rheological and drag reduction characteristics of xanthan gum solutions”, *Rheologica Acta*, vol. 27, pp. 617-627, 1988.
- [11] Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Ribeiro, C., Miranda, C., Maia, J. M., Teixeira, J. A. e Vicente A. A. “Characterization of galactomannans extracted from seeds of *Gleditsia triacanthos* and *Sophora japonica* through shear and extensional rheology: Comparison with guar gum and locust bean gum”, *Food Hydrocolloids*, vol. 24, pp.184-192, 2010.
- [12] Bozzel, J. J., O’Lenick, C. J. e Warwick, S. “Biomass Fractionation for the Biorefinery: Heteronuclear Multiple Quantum Coherence Nuclear Magnetic Resonance Investigation of Lignin Isolated from Solvent Fractionation of Switchgrass”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 59, pp. 9232–9242, 2011.
- [13] Bozzi, A., Perrin, C., Austin, S. e Vera, F. A. “Quality and authenticity of commercial aloe vera gel powders”, *Food Chemistry*, vol. 103, pp. 22-30, 2007.
- [14] 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.
- [15] Campestrini, L. H., Silveira, J. L. M., Duarte, M. E. R., Koop, H. S. e Nosedá, M. D. “NMR and rheological study of *Aloe barbadensis* partially acetylated glucomannan”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 94, pp. 511-519, 2013.
- [16] Chatterjee, S., Clingenpeel, A., McKenna, A., Rios, O. e Johs, A. “Synthesis and characterization of lignin-based carbon materials with tunable microstructure”, *The Royal Society of Chemistry*, vol. 4, pp. 4743-4753, 2014.
- [17] 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.
- [18] Chinchilla, N., Carrera, C., Durán, A. G., Macías, M., Torres, A. e Macías, F. “Aloe barbadensis: how a miraculous plant becomes reality”, *The Phytochemical Society of Europe*, 2003.
- [19] 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.
- [20] Chow, J.T., Williamson, D.A., Yates, K. M. e Goux, W.J. “Chemical characterization of the immunomodulating polysaccharide of Aloe Vera L.”, *Carbohydrate Research*, vol. 340, pp. 1131-1142, 2005.
- [21] 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.
- [22] Diehl, B. “NMR spectroscopy in pharmaceutical analysis”, Germany: Elsevier, 2008. pp. 157-180. Chapter 2.
- [23] 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.
- [24] Edwards, J. “Quantification of Whole Leaf Markers in Aloe Vera Raw Materials and Products by ¹H NMR Spectroscopy”, *Process NMR Associates*, pp. 1-2, 2012.
- [25] 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.
- [26] Fabula, G. “Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction”, *Trans ASME Journal of Basic Engineering*, vol.93, pp. 453-455, 1971.
- [27] Femenia, A., Sánchez, E. S., Simal, S. e Rosseló, C. “Compositional features of polysaccharides from Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) plant tissues”, *Carbohydrate Polymers*, vol. 39, pp. 109-117, 1999.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Franchetti, S. M. M. e Marconato, J. C. "Polímeros biodegradáveis – uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos", *Química Nova*, vol. 29, pp. 811-816, 2006.
- [31] Franco, V. Y. Z. "Extracción de pectina de residuos de cáscara de naranja por hidrólisis ácida assistida por micro-ondas (HMO)", *Investigación & Desarrollo*, vol. 1, pp. 65-76, 2015.
- [32] Fuentes R. M., Torres, L. M., Laredo, R. F. G., Eim, V. e Femenia, A. "Influence of water deficit on the main polysaccharides and the rheological properties of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) mucilage", *Industrial Crops & Products*, vol. 109, pp. 644-653, 2017.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Grindlay, D. e Reynolds T., "The aloe vera phenomenon: a review of the properties and modern uses of the leaf parenchyma gel", *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 16, pp.117-151, 1986.
- [36] Gowda, D. C., Neelisiddaiah, B., Anjaneyalu, Y. V. "Structural studies of polysaccharides from aloe vera", *Carbohydrate Research*, vol. 71, pp. 201-205, 1979.
- [37] Jensen, W. B. "The Origin of the Names Malic, Maleic, and Malonic Acid", *Journal of Chemical Education*, vol. 84, 2007

- [38] Joseph, D. D. "Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids", New York: Springer Verlag, vol. 84, 1990.
- [39] 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.
- [40] Kameneva, M. V. "Microrheological effects of drag-reducing polymers in vitro and in vivo", *International Journal of Engineering Science*, vol. 59, 168-183, 2012.
- [41] 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.
- [42] Kumar, R., Enjamuri, N., Shah, S., Al-Fatesh, A. S., Suárez, J. J. B. e Chowdhury, B. "Ketonization of Oxygenated Hydrocarbons on Metal Oxide Based Catalysts", *Catalysis Today*, pp. 1-124, 2017.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Li, L., McKenna, K. R., Li, Z., Yadav, M., Krishnamurthy, R., Liotta, C. L. e Fernández, F. M. "Rapid resolution of carbohydrate isomers via multi-site derivatization ion mobility-mass spectrometry", *The Royal Society of Chemistry*, 2018.
- [46] Lima, R. L. S., Severino, L. S., Cazetta, L. O., De Azevedo, C. A. V., Sofiatti, V. e Arriel, N. H. C. "Redistribuição de nutrientes em folhas de pinhão-mansão entre estágios fenológicos", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, pp. 1175-1179, 2011.
- [47] Lumley, J. L. "Drag reduction by additives", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 11, pp. 367-384, 1969.

- [48] Lumley, J. L. "Drag reduction in turbulent flow by polymer additives", *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, vol. 7, pp. 263-290, 1973.
- [49] 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.
- [50] Mandal, G. e Das, A. "Structure of the glucomannan isolated from the leaves of aloe barbadensis miller", *Carbohydrate Research*, vol. 87, pp. 249-256, 1980.
- [51] Marhefka, J. N. "Study of drag reducing polymers and mechanisms of their intravascular effect", University of Pittsburgh, degree of Doctor of Philosophy, 2007.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Molognoni, L., Daguer, H., Ploêncio, L. A. de S. e Lindner, J. D. D. "A multi-purpose tool for food inspection: Simultaneous determination of various classes of preservatives and biogenic amines in meat and fish products by LC-MS", *Talanta*, 2017.
- [55] Monakhova, Y. B., Randel, G. e Diehl B. W. K. "Automated Control of the Organic and Inorganic Composition of Aloe vera Extracts Using ^1H NMR Spectroscopy", *Journal of AOAC International*, vol. 99, pp. 1213-1218, 2016.
- [56] Monteiro, J. E. B. A., Sentelhas, P. C., Chiavegato, E. J., Guiselini, C., Santiago, A. V. e Prela, A. "Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas", *Rede de Revistas Científicas da América Latina*, vol. 64, pp. 15-24, 2005.
- [57] Morris, E. R. "Molecular Origin of Xanthan Solution Properties", *Extracellular Microbial Polysaccharides*, ACS Symposium Series, Chapter 6, vol. 45, pp. 81-89, 1977.

- [58] 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.
- [59] Moussa, T. e Tiu, C. "Factors affecting polymer degradation in turbulent pipe flow," *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681–1692, 1994.
- [60] 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.
- [61] Muños, O. M., Leal, X., Quintral, V. e Cardemil, L. "Extraction, Characterization and Properties of the Gel of Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller) Cultivated in Chile", *Medicinal & Aromatic Plants*, vol. 4, pp. 1-7, 2015.
- [62] Mysels, K. J. "Flow of thickened fluid," US Patent 2 492, 173, December 27, 1949.
- [63] Nageshwari, M., Kumari, C. R. T., Vinitha, G., Mohamed, M. P., Sudha, S. e Caroline, M. L. "Crystal growth, structural, spectral, thermal, dielectric, linear and nonlinear optical characteristics of a new organic acentric material: L-Methionine-Succinic acid", *Journal of Molecular Structure*, pp. 1-28, 2017.
- [64] Nakken, T., Tande, M. e 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.
- [65] Odell, J. A., Keller, A. e Miles, M. J. "A Method for Studying FlowInduced Polymer Degradations - Verification of Chain Halving", *Polymer Communication.*, vol. 24, pp. 7-10, 1983.
- [66] 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.
- [67] Paleari, L. M. e Dos Santos, F. A. M. "Papel do indumento piloso na proteção contra a herbívora em *miconia albicans* (melastomataceae)", *Revista Brasileira de Biologia*, v. 58, pp. 151-157, 1998.

- [68] Pandhair, V., Diviya, J., Joginder, S. e Gossal, S. S. "Biochemical studies of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel of the field grown and micropropagated plants at different developmental stages", *Journal Plant Biochemistry and Biotechnology*, vol. 20, pp. 283-287, 2011.
- [69] Pandley, A. e Singh, S. "Aloe vera: A systematic review of its industrial and ethno-medicinal efficacy", *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*, vol. 5, pp. 21-33, 2016.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Pereira, A. S., Mompean, G., Thais, L. e Soares, E. J. "Transient aspects of drag reducing plane Couette flows", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 241, pp. 60-69, 2017.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Pines, D., Ditkovich, J., Mukra, T., Miller, Y., Kiefer, P. M., Daschakraborty, S., Hynes, J. T. e Pines, E. "How acidic is carbonic acid?", *The Journal of Physical Chemistry*, pp. A-L, 2016.
- [76] Ptasinski, P. K., Nieuwstadt, F. T. M., Van den Brule, B. H. A. A., e Hulsen, M. A. "Experiments in turbulent pipe flow with polymer additives at maximum drag reduction", *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 66, pp. 159-182, 2001.

- [77] Ray, A. e Aswatha, S. M. "An analysis of the influence of growth periods on physical appearance, and acemannan and elemental distribution of Aloe vera L. gel", *Industrial Crops and Products*, vol. 48, pp. 36-42, 2013.
- [78] Ray, A. e Gupta S. D. "A panoptic study of antioxidant potential of foliar gel at different harvesting regimens of Aloe vera L.", *Industrial Crops and Products*, vol. 51, pp. 130-137, 2013.
- [79] Roboz, E. e Smit A. J. H. "A Mucilage from aloe vera", *Biological Science*, vol. 70, pp. 3248-3249, 1948.
- [80] Ryskin, G. "Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory", *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 2059-2062, 1987.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] Scala, K. D., Gálvez, A. V., Hen, K. A., Mancilla, Y. N., Munizaga, G. T., Won, M. P. e Giovagnoli, C. "Chemical and physical properties of aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel stored after high hydrostatic pressure processing", *Food Science and Technology*, vol. 33, pp. 52-59, 2013.
- [86] Shi, X., Wang, X., Tang, B., Dai, Z., Chen, K. e Zhou, J. "Impact of lignin extraction methods on microstructure and mechanical properties of lignin-based carbon fibers", *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1-7, 2017.

- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] Soares, E. J., Siqueira, R. N., Coelho, E. C. e Barbosa, K. C. O. "Bio-redutor de arrasto a base de mucilagem e fibra de quiabo para escoamentos turbulentos em dutos", Patente BR 10 2016 013995 3, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- [91] 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.
- [92] 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.
- [93] Tabor, M. e De Gennes, P. G. "A cascade theory of drag reduction", Europhysics Letter, vol. 7, pp. 519-522, 1986.
- [94] 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.
- [95] Turner, S. e Kumar, M. "Cellulose synthase complex organization and cellulose microfibril structure", The Royal Society, pp. 1-11, 2017.
- [96] 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.

- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] Virk, P.S. Sherman, D.C. e Wagger, D.L. Additive equivalence during turbulent drag reduction, *AIChE Journal*, vol. 43, pp. 3257-3259, 1997.
- [100] Virk, P.S. "Drag reduction by collapsed and extended polyelectrolytes", *Nature*, vol. 253, pp. 109-110, 1975.
- [101] Virk, P. S. "Drag reduction fundamentals", *AIChE Journal*, vol. 21, pp. 625-656, 1975.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] 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.
- [105] Yaron, A. "Characterization of Aloe vera Gel before and after Autodegradation, and Stabilization of the Natural Fresh Gel", *Phytotherapy Research*, vol. 7, pp. 11-13, 1993.