

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

Michell Luiz Costalonga

**REDUÇÃO DE ARRASTE POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS EM ESCOAMENTOS
TURBULENTOS EM ESPAÇOS ANULARES**

VITÓRIA
2017

MICHELL LUIZ COSTALONGA

**REDUÇÃO DE ARRASTE POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS EM ESCOAMENTOS
TURBULENTOS EM ESPAÇOS ANULARES**

Trabalho apresentado 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

Co-orientador: Prof. Dr. Bruno Venturini
Loureiro

VITÓRIA

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

C837r Costalonga, Michell Luiz, 1990-
Redução de arraste por adição de polímeros em
escoamentos turbulentos em espaços anulares / Michell Luiz
Costalonga. – 2017.
76 f. : il.

Orientador: Edson José Soares.
Coorientador: Bruno Venturini Loureiro.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Arrasto (Aerodinâmica). 2. Polímeros. 3. Escoamento.
4. Soluções poliméricas. 5. Degradação polimérica. 6. Espaço
anular. I. Edson José Soares. II. Loureiro, Bruno Venturini.
III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
IV. Título.

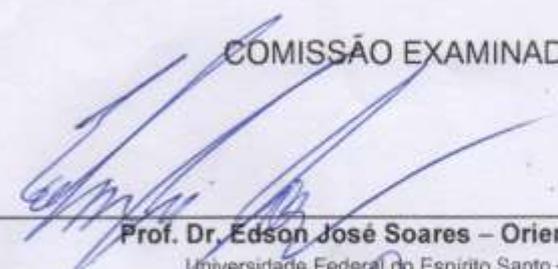
CDU: 621

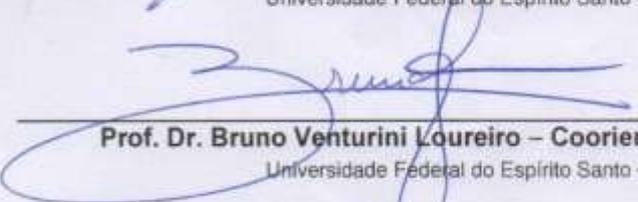
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

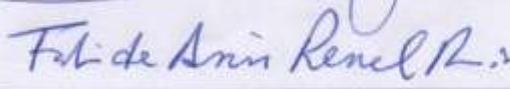
“Redução de arraste por adição de polímeros em escoamentos turbulentos em espaços anulares”

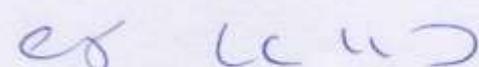
Michell Luiz Costalonga

COMISSÃO EXAMINADORA


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


Prof. Dr. Bruno Venturini Loureiro – Coorientador
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES


Prof. Dr. Fabio de Assis Ressel Pereira – Examinador externo
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES


Prof. Dr. André Leibsohn Martins – Examinador externo
CENPES/Petrobrás

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Vitória (ES), 15 de março de 2017.

*“A partir de certo ponto não há retorno e esse
é o ponto que é preciso alcançar.”*

Franz Kafka

Aos meus pais.

Agradecimentos

Agradeço a minha família por todo o apoio que me deram. Aos meus pais, Luiz Nivaldo Costalonga e Maria Aparecida Costalonga, meus maiores mestres e minha irmã Marcia Cristine Costalonga de Oliveira. Aos meus primos Flávio Costalonga e Fernando Costalonga por terem sido sempre grandes exemplos na minha vida.

Agradeço ao professor e co-orientador, Bruno Venturini Loureiro, por estar sempre disposto a ajudar desde a minha graduação e por ter sido crucial no meu desenvolvimento acadêmico. Acima de tudo, às oportunidades de desenvolver trabalhos juntos permitindo sempre a possibilidade de adquirir novos conhecimentos.

Agradeço ao professor e orientador, Edson José Soares, pelas discussões acerca do assunto deste trabalho, discussões essas que permitiram o desenvolvimento e finalização desta dissertação de mestrado.

Agradeço ao meu amigo Lucas Antônio Silveira Silva por todo o apoio e contribuição com as discussões para este trabalho.

Agradeço à todos os professores que, desde a minha graduação até o mestrado, ajudaram, direta e indiretamente, e que sem o conhecimento passado por eles, não chegaria até aqui.

Agradeço à Faculdade do Centro Leste (UCL) pela flexibilidade do horário, permitindo que eu iniciasse o mestrado e por disponibilizar o espaço para realização dos ensaios. Além disso, agradeço aos estagiários do Laboratório de Fluidos e Fenômenos de Transporte (LFFT-UCL) por toda a ajuda do início até o final deste trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas de mestrado, Alan, Gabriel e Kelvin, por estarem sempre presente desde o início.

Resumo

A redução de arraste (DR) pela adição de pequenas quantidades de polímeros, surfactantes e fibras em escoamento turbulento já vem sendo estudada há mais de sessenta anos e possui diversas aplicações como o transporte de líquidos em tubulações, combate à incêndio, medicina e muitos outros. Até agora, a maior parte dos trabalhos que estudam a redução de arraste utilizam tubos circulares, canais e geometrias rotativas. Não há muitos trabalhos sobre o fenômeno de redução de arraste em um escoamento axial em espaço anular. É importante notar que este tipo de escoamento ocorre em diversas aplicações importantes, como por exemplo na indústria do petróleo. Assim, na tentativa de entender as principais diferenças entre a redução de arraste no espaço anular e àquela observada em tubos, uma sequência de testes foram conduzidos através de uma bancada experimental. Diversos ensaios foram realizados utilizando soluções poliméricas com óxido de polietileno, poliácridamida e goma xantana com concentrações de 25, 50, 100 e 200 ppm. Os dados principais estão apresentados em termos de DR em função de um tempo adimensional, que nada mais é do que uma estimativa para o número de vezes que o volume inicial de fluido circula pela bancada experimental. Fazendo isso, em adição à redução de arraste, é possível observar a queda de eficiência causada pela degradação mecânica.

palavras-chave: redução de arrasto, soluções poliméricas, degradação, espaço anular.

Abstract

The drag reduction (DR) by injection of small amounts of polymers, surfactants and fibers in turbulent flow has been studied for over sixty years. The applications include transport of liquids in pipelines, firefighting operations, bio-medicine among many others. Up to now, the most part of the works is related flow in tubes, channels and rotating geometries. In fact there are not as many papers in which the drag reducing flow in an annular space has been considered and this is the main point of the present work. It is worth noting that the axial flow in annular space occurs in many industrial applications and it is relevant in several processes, as those in the drilling industry. Hence, in attempt to understand the main difference between the drag reduction in annular spaces in comparison to that one observed in tubes, it was conducted a sequence of experiments by aid of an experimental setup. We used different polymer solutions with different concentrations. The main data are presented in terms DR over the number of pass through the experimental system. By doing so, in addition to DR, we were able to take into account the fall of efficiency caused by mechanical polymeric degradation.

keywords: drag reduction, polymers solution, degradation, annular space.

Lista de Figuras

1.1	Teste experimental realizado pelos bombeiros de Nova Iorque.	2
1.2	Curva característica da bomba e curva de um sistema qualquer.	4
1.3	Representação esquemática de (a) polímeros lineares, (b) polímeros ramificados e (c) cadeias poliméricas.	6
1.4	Interação dos polímeros com as estruturas turbulentas do escoamento.	9
2.1	Esquema em duas dimensões de um espaço anular qualquer.	16
2.2	Esquema das forças que atuam no volume de controle para um espaço anular.	17
3.1	Esquema da bancada experimental montada com o espaço anular.	21
3.2	Esquema tridimensional da bancada experimental montada com o (a) tubo circular e com o (b) espaço anular.	22
3.3	Testes de diluição da goma xantana utilizando água da torneira.	24
3.4	Testes de diluição do óxido de polietileno utilizando água da torneira.	24
3.5	Testes de diluição da poliacrilamida utilizando água da torneira.	25
3.6	Esquema mostrando o que é a razão de raios, a	27
3.7	Resultado das validações de todas as geometrias usadas com base na definição geral do número de Reynolds.	28
3.8	Resultado das validações de todas as geometrias usadas com base na definição do número de Reynolds utilizando o diâmetro hidráulico.	29
3.9	Viscosidade das soluções com (a) PEO, (b) PAM e (c) XG.	31
4.1	Efeito da concentração utilizando soluções com PEO no tubo circular ($a = 0$).	37
4.2	Efeito da concentração utilizando soluções com XG no tubo circular ($a = 0$).	37
4.3	Esquema para explicar a degradação no interior da bomba.	40

4.4	Efeito da concentração utilizando soluções com PEO no primeiro espaço anular ($a = 0, 2310$).	42
4.5	Efeito da concentração utilizando soluções com PAM no primeiro espaço anular ($a = 0, 2310$).	42
4.6	Efeito da concentração utilizando soluções com XG no primeiro espaço anular ($a = 0, 2310$).	43
4.7	Efeito da concentração utilizando a XG no segundo espaço anular ($a = 0, 3505$).	46
4.8	Efeito da concentração utilizando o PEO no terceiro espaço anular ($a = 0, 5759$).	48
4.9	Efeito da concentração utilizando a XG no terceiro espaço anular ($a = 0, 5759$).	48
4.10	Efeito da geometria na DR com as soluções com XG.	51
4.11	Efeito da geometria no DR com as soluções com PEO.	53

Lista de Tabelas

3.1	Relação dos diâmetros de tubos e barras redondas utilizadas na bancada experimental.	26
3.2	Diferença entre o fator de atrito experimental e o calculado pela correlação de Colebrook para a análise utilizando a definição geral do número de Reynolds. .	28
3.3	Diferença entre o fator de atrito experimental e o calculado pela correlação de Colebrook para a análise utilizando o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico.	29
3.4	Propriedades das soluções com o polímero XG.	31
3.5	Propriedades das soluções com o polímero PEO.	31
3.6	Propriedades das soluções com o polímero PAM.	32
3.7	Resultados dos cálculos da análise de incertezas para o fator de atrito.	34
4.1	Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no tubo.	39
4.2	Taxa de degradação inicial das soluções com XG no tubo.	39
4.3	Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$	44
4.4	Taxa de degradação inicial das soluções com PAM no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$	44
4.5	Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$	44
4.6	Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,3505$	46
4.7	Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no espaço anular com razão de raios $a = 0,5759$	49

4.8	Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,5759$	49
-----	---	----

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Estado da Arte	5
1.3 Caracterização do Problema	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Parâmetro Para Comparação dos Resultados	13
2.2 Tubo Circular	15
2.3 Espaço Anular	15
2.4 Fator de Atrito	18
2.5 Tempo Adimensional	19
3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL	20
3.1 Montagem Experimental	20
3.2 Preparo e Tempo de Diluição das Amostras	23
3.3 Condição de Estoque das Amostras	25
3.4 Descrição dos Experimentos	25
3.4.1 Validação da bancada experimental	25
3.4.2 Ensaios com as soluções poliméricas	30

3.5	Análise de Incertezas	33
4	RESULTADOS	35
4.1	Efeitos de Concentração e Tipo de Polímeros na Redução de Arraste	35
4.1.1	Tubo circular, $a = 0$	35
4.1.2	Espaço anular, $a = 0,2310$	40
4.1.3	Espaço anular, $a = 0,3505$	45
4.1.4	Espaço anular, $a = 0,5759$	46
4.2	Efeito da geometria na redução de arraste	49
4.2.1	Goma xantana, $\overline{M}_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$	50
4.2.2	Óxido de polietileno, $M_v = 4,6 \times 10^6 \text{ g/mol}$	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Nesta seção é proposta uma revisão detalhada do estado da arte em redução de arraste pela adição de polímeros através de uma abordagem histórica, citando trabalhos relevantes na área a fim de destacar características importantes. Alguns conceitos fundamentais são introduzidos inicialmente para tornar o texto auto-suficiente para os leitores sem formação básica no assunto.

1.1 Motivação

Durante o transporte de um fluido qualquer, quando submetido a altos números de Reynolds, ocorre uma significativa perda de carga. Essa perda de carga aumenta de acordo com o número de Reynolds e, conseqüentemente, mais energia é necessária para manter o escoamento. É possível diminuir essa perda de energia através da utilização de redutores de arraste. A redução de arraste pode ser obtida a partir da mudança geométrica da superfície ou pela adição de aditivos. Esses aditivos podem ser polímeros, surfactantes, fibras de algodão, nylon e amianto e bolhas de gás. Em tubulações, por exemplo, a adição de polímeros pode proporcionar até 80 % de redução de arraste. A técnica de adição de aditivos já vem sendo estudada há mais de sessenta anos e tem sido aplicada em processos industriais de fronteira tecnológica ou onde se deseja a redução do consumo de energia para transporte do fluido [1].

Forrest e Grierson (1931 *apud* Wang *et al* [2]) notaram a redução da perda de energia em um escoamento turbulento de água com fibra de celulose, porém, esse primeiro relato passou

despercebido. Foi apenas em 1948, a partir do experimento realizado por Toms que o fenômeno obteve a devida importância [3]. O experimento de Toms consistia em estudar o escoamento de soluções com aditivos de alto peso molecular, na ordem de partes por milhão em peso, em altos números de Reynolds. Neste experimento foi observado um aumento da vazão mantendo um mesmo gradiente de pressão e uma diminuição da queda de pressão em escoamentos turbulentos para as soluções com os aditivos para uma mesma vazão, quando comparadas ao solvente puro apenas. Esse efeito ficou conhecido como o fenômeno de Toms [3]. Foi apenas mais tarde, em 1964, que o fenômeno foi chamado de redução de arraste por Savins [4]. Além do grande impacto nos estudos básicos de turbulência, a sua contribuição também é notável devido à solução de problemas ambientais ou por tornar as indústrias mais rentáveis com menor consumo de energia [5].

A partir do seu descobrimento, a redução de arraste vem sendo estudada por diversos pesquisadores, veja [3, 4, 6, 7, 8, 9], e possui diversas aplicações. A aplicação de maior sucesso de redução de arraste pela adição de polímeros é o caso do *Trans-Alaska Pipeline*, onde óleo bruto é transportado em uma tubulação de 1,20 metros de diâmetro através de 1288,00 quilômetros de extensão, onde obtém-se 40 % de redução do fator de atrito [10]. A utilização de soluções poliméricas para combate a incêndio é outra opção. Os resultados indicam que através da adição de polímeros o alcance do jato de água é maior, o que proporciona maior segurança aos combatentes [11, 12]. A Figura (1.1) mostra um exemplo da utilização de aditivos no combate à incêndio. O teste foi realizado com dois sistemas idênticos, onde os mesmos estão bombeando os fluidos de dois reservatórios distintos, o reservatório do sistema à esquerda possui aditivos, enquanto no reservatório do sistema à direita, escoava água pura. Assim, é possível observar que o reservatório com aditivos possui uma maior capacidade de alcance de jato.



Figura 1.1: Teste experimental realizado pelos bombeiros de Nova Iorque. **Fonte:** [13].

Barati e Liang [14] relata também o uso de aditivos no processo de fraturamento hidráulico, onde o fluido, denominado *slickwater*, constituído principalmente de água e uma baixa concentração de polímeros lineares é injetado à altas pressões no poço. A baixa concentração de polímero serve, principalmente, para reduzir a perda de carga ao longo da linha. Outra aplicação de grande sucesso é a utilização de aditivos em hidrelétricas e sistemas de irrigação para aumentar a vazão da solução [15] e para o transporte de lamas e suspensões [16].

Quanto as aplicações biomédicas, Greene *et al.* [17] mostram que há uma diminuição de queda de pressão no escoamento em uma artéria com 40 ppm de polímero e que essa diminuição sugere um amortecimento da dissipação da energia turbulenta quando os agentes redutores de arraste estão presentes. Além disso, Greene e Madan [18] realizaram estudos *in vitro*¹ com sangue de bezerro e os resultados mostraram que a utilização de 100 à 300 ppm de polímero pode reduzir de 30 à 60 % as taxas de hemólise². Mais tarde, em um estudo da utilização de polímeros para combater o início da aterosclerose³ foi percebido que os pássaros que receberam o polímero apresentaram menos placas de gordura do que os que não receberam [19].

Um outro exemplo que pode ser dado é o de um sistema qualquer, como o da Fig. (1.2). O eixo da ordenada mostra a altura manométrica total e o eixo da abscissa a vazão volumétrica. A linha azul é a curva característica e a verde é a curva do rendimento de uma bomba centrífuga qualquer. Para um dado sistema composto por tubulações, curvas e acessórios é possível determinar o ponto de operação da bomba. O ponto de operação fornece a vazão volumétrica, o rendimento e a perda de carga total do sistema em que a bomba irá operar. A linha preta sólida indica a curva do sistema, com ponto de operação 1 (PO 1), escoando um líquido qualquer sem aditivos em uma linha de produção. É possível aumentar a produção dessa linha através da adição de polímeros, sem a necessidade de modificar a tubulação do sistema para se obter uma menor perda de carga. A adição de polímeros nesse sistema com bomba centrífuga nos permitirá observar dois fenômenos: o primeiro é a diminuição da perda de carga e, o segundo, o aumento da vazão. Sendo assim, a adição dos polímeros nos dará uma outra curva. A linha preta tracejada mostra a curva do sistema para o líquido com aditivo. No ponto de operação 2 (PO 2) é possível notar que há o aumento da vazão volumétrica e do rendimento em comparação ao ponto de operação 1 (PO 1) para o mesmo sistema de bombeio utilizado. De fato, é notável

¹realizado em laboratório [19].

²destruição das células vermelhas, também chamadas de hemácias ou eritrócitos [19].

³uma condição das artérias caracterizada pelo depósito de placas de gordura [19].

a diminuição da perda de carga, comparando-se os valores da altura manométrica total para os dois pontos de operação.

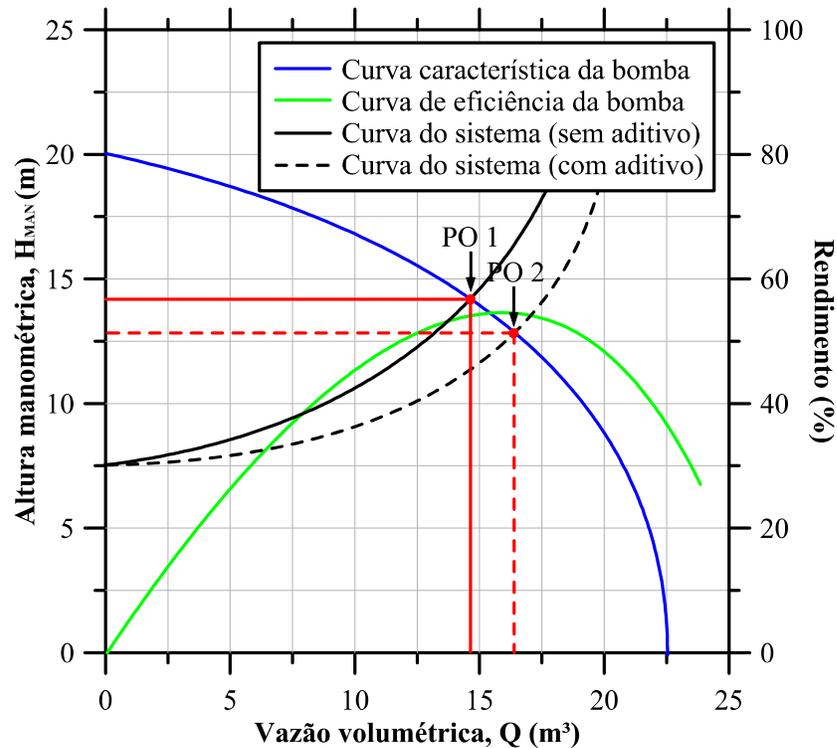


Figura 1.2: Curva característica da bomba e curva de um sistema qualquer.

A maioria dos estudos em DR já reportados consideram o escoamento em tubos, canais e geometrias rotativas. O espaço anular, apesar de muito comum em diversas aplicações não foi ainda razoavelmente estudado. O escoamento axial nessa geometria é encontrado em diversas aplicações industriais e, principalmente, em diversos processos relevantes nas indústrias petrolíferas. Apesar de haver muitos estudos sobre o escoamento axial em espaços anulares na literatura [20, 21, 22, 23, 24], não há muitos estudos realizados sobre o fenômeno de redução de arraste no mesmo [25, 26].

A maior limitação dos aditivos poliméricos é a degradação mecânica quando sujeitos a altas taxas de cisalhamento e alongamento mecânico, como aqueles encontrados na maioria das bombas [27]. A degradação mecânica se refere ao processo de cisão da cadeia polimérica, fazendo com que a ligação se quebre e que diminua o peso molecular médio, conseqüentemente [28]. Quando isto ocorre, os segmentos menores formados não são tão efetivos como redutores de

arraste. Esse processo de degradação aumenta com a temperatura, além de ser irreversível, uma vez que possui uma pequena chance dos segmentos se recombinarem [27]. Devido à isso, os polímeros não são adequados para a utilização em sistemas com recirculação.

Essa limitação vem sendo estudada por diversos pesquisadores [9, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]. Alguns parâmetros importantes são o peso molecular e a concentração do polímero, a qualidade do solvente, o número de Reynolds e a temperatura. Entretanto, ainda que a degradação ocorra, ela não continua indefinidamente [32, 38]. Apesar de haver grandes quantidades de informações sobre o assunto, não se pode dizer que o fenômeno de redução de arraste é inteiramente entendido. De fato, o mecanismo físico responsável pela redução de arraste não é totalmente compreendido [39].

1.2 Estado da Arte

A redução de arraste é um fenômeno que vem sendo estudado há mais de sessenta anos após ser reportada por Toms [5]. Em seu experimento, Toms demonstrou que a adição de pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular em um escoamento em regime turbulento poderia reduzir a perda de energia quando comparado ao solvente puro [3].

Os polímeros são grandes moléculas que se originam de um fenômeno de polimerização a partir de um monômero [40]. É possível classificar os polímeros com base em diversos aspectos. Podemos classificá-los de acordo com: o processo de polimerização usado para produzi-los; a sua estrutura; e as suas propriedades [41]. A polimerização pode ser natural ou artificial [41, 40].

Quanto à estrutura, podemos dividi-los em polímeros lineares, ramificados e cadeias poliméricas [41]. A Figura(1.3) mostra os esquemas dessas três classificações.

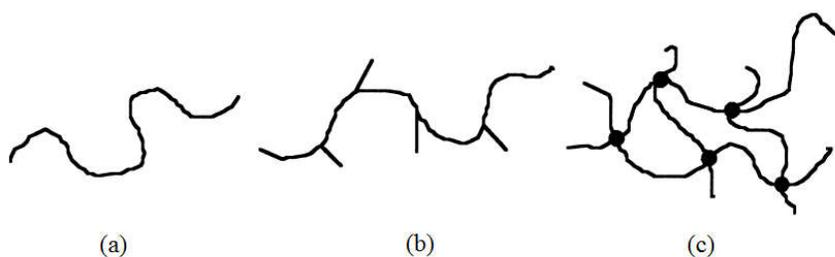


Figura 1.3: Representação esquemática de (a) polímeros lineares, (b) polímeros ramificados e (c) cadeias poliméricas. **Fonte:** [41].

As classificações quanto à estrutura e suas propriedades estão intimamente ligadas, uma vez que uma depende diretamente da outra. Baseado nas suas propriedades é possível dividi-los como termoplásticos, elastômeros e termoendurecíveis [41]. Ainda, é comum dividir os polímeros entre rígidos e flexíveis. Além das classificações já citadas, existem diversas outras possibilidades, mas para a redução de arraste a classificação estrutural e de acordo com a rigidez são, provavelmente, as mais importantes.

Savins [4] foi o primeiro a definir o fenômeno e baseou sua definição com base na queda de pressão da solução comparada àquela do solvente puro. A Equação (1.1) mostra a razão de arraste, onde Δp é a queda de pressão da solução e Δp_o é a queda de pressão do solvente em uma mesma vazão, no mesmo tubo. Através da Eq. (1.1) fica claro que qualquer fluido que apresente uma razão de arraste menor que um, ou seja, $D_R < 1$ é um redutor de arraste [2, 42].

$$D_R = \frac{\Delta p}{\Delta p_o} \quad (1.1)$$

A definição da redução de arraste é obtida através da Eq. (1.2).

$$DR(\%) = (1 - D_R) \times 100 \quad (1.2)$$

Lumley [43] definiu a redução de arraste como a diminuição do fator de atrito em regime turbulento, quando comparado ao fator de atrito do solvente puro com o mesmo número de Reynolds.

Essa é a definição utilizada neste trabalho. A Eq. (1.3) mostra a definição algébrica, onde f é o fator de atrito da solução e f_o é o fator de atrito do solvente puro.

$$DR(\%) = \left(1 - \frac{f}{f_o}\right) \times 100 \quad (1.3)$$

Em uma série de trabalhos pioneiros, Virk [29, 30, 31] demonstrou que a eficiência da redução de arraste por polímeros é uma função universal da concentração, peso molecular e da vazão e, conseqüentemente, do número de Reynolds e que o início da redução de arraste utilizando soluções poliméricas ocorre de uma maneira muito bem definida. Em seus estudos, foi percebido que a redução de arraste aumenta com o incremento da concentração, peso molecular e do número de Reynolds. Além disso, foi percebido também que a qualidade do solvente interfere diretamente no fenômeno, uma vez que bons solventes permitem que os polímeros fiquem menos enrolados. Entretanto, a máxima redução de arraste possível de atingir com soluções poliméricas é limitada por uma assíntota, denominada assíntota de máxima redução de arraste (MDR), ou assíntota de Virk, e é independente do polímero e do diâmetro da tubulação [29, 31]. A assíntota de máxima redução de arraste é fornecida pela Eq. (1.5) [30], onde Re é o número de Reynolds e $f_{Fanning}$ é o fator de atrito de Fanning.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Fanning}}} = 19,0 \log_{10}(Re \sqrt{f_{Fanning}}) - 32,4 \quad (1.4)$$

Sabendo que $4 \times f_{Fanning} = f_{Darcy}$ é possível escrever a Eq. (1.4) com base no fator de atrito de Darcy, f_{Darcy} , Eq. (1.5).

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Darcy}}} = 9,5 \log_{10}(Re \sqrt{f_{Darcy}}) - 19,06 \quad (1.5)$$

O patamar de máxima redução de arraste pode ser alcançado de algumas maneiras, uma delas é fixando a concentração e aumentando o número de Reynolds. Outra se dá fixando o número de Reynolds e aumentando a concentração do polímero na solução. Além das duas maneiras citadas é possível alcançar o patamar de máxima redução de arraste aumentando-se o peso

molecular do polímero [29]. Quando a máxima redução de arraste é alcançada através do aumento da concentração, qualquer incremento da mesma irá ocasionar um aumento do arraste [44]. Deve ficar claro que o valor alcançado da redução de arraste quando atingido a assíntota de Virk é o mesmo, aproximadamente 80 %, entretanto, o valor dos fatores de atrito mudam de acordo com as condições do escoamento.

Apesar de haver muitos estudos sobre a redução de arraste, ainda não existem teorias completamente aceitas para explicar seu mecanismo físico. Pode-se dividir as teorias em duas linhas; uma baseada nos efeitos viscosos [39, 45, 46, 47, 48, 49] e outra nos efeitos elásticos [50, 51, 52, 53].

O argumento básico da teoria viscosa considera que o esticamento completo do polímero induz um aumento da ordem de dez mil da viscosidade efetiva [46]. Esse aumento proporciona a supressão nas tensões de Reynolds, que são os principais agentes para o fluxo de momento no caso newtoniano, essa supressão resulta em um aumento da velocidade média do escoamento [49]. O aumento da viscosidade, conseqüentemente, provoca o aumento da dissipação de energia, porém, esse aumento é irrisório quando comparado à redução de arraste em si [49].

A teoria elástica sugerida primeiramente por Tabor e De Gennes [50] propõe que os polímeros atuam como pequenas molas que absorvem a energia dos vórtices menores, transformando-a em energia elástica, e devolvem ao escoamento se o tempo de relaxação do polímero é grande o suficiente. O tempo de relaxação é o tempo necessário para que o polímero retorne ao seu estado de equilíbrio e está relacionada com a massa específica e viscosidade da solução [54]. Essa teoria sugere que a cascata de turbulência é interrompida prematuramente, uma vez que os polímeros impedem os vórtices menores de se formar, apresentando a redução de arraste devido ao aumento do módulo elástico da solução. Essa teoria considera que a viscosidade não é um parâmetro dominante, uma vez que existe a assíntota de máxima redução de arraste, caso contrário, o arraste diminuiria independente da concentração de polímero [53]. Estudos experimentais mostram que existe um ponto de saturação, como citado anteriormente, e que isso não ocorre. Vale notar que apesar da teoria elástica ser uma proposta mais nova para explicar o mecanismo de redução de arraste, isso não implica que a teoria viscosa esteja incorreta [52].

Dubief *et al.* [55] propõem um mecanismo de interação dos polímeros flexíveis com as estruturas do escoamento turbulento. Através de simulações numéricas utilizando o modelo FENE-P (*Finitely Extensible Nonlinear Elastic – Peterlin*) os autores chegaram à conclusão que os

polímeros acumulam e cedem energia ao escoamento de maneira organizada e que isso se repete ao longo do tempo. A absorção de energia acontece ao redor dos menores vórtices próximos às paredes e quando as moléculas voltam a se esticar, a energia é devolvida na direção do escoamento. A Figura(1.4) é um esquema de como isso acontece. O polímero, inicialmente enrolado e próximo à parede, interage com o vórtice absorvendo e armazenando a energia cinética das direções transversais ao escoamento ($E_\alpha < 0$). Ao ser enviado, novamente, às regiões próximas das paredes, o polímero se estica e devolve a energia cinética na direção principal do escoamento ($E_x > 0$).

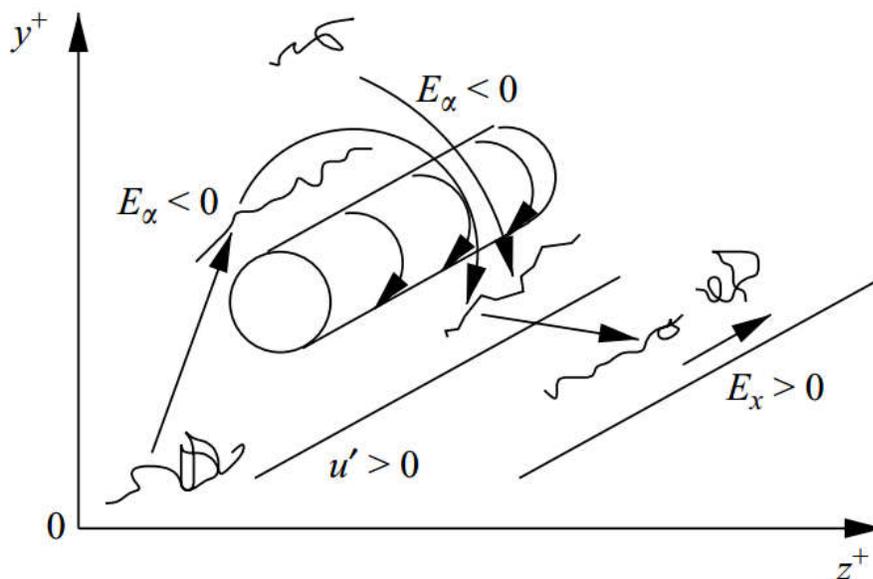


Figura 1.4: Interação dos polímeros com as estruturas turbulentas do escoamento. **Fonte:** [55].

A teoria elástica explica muito bem o fenômeno para polímeros flexíveis, porém, para polímeros rígidos onde as moléculas não se enrolam, nem se esticam como nos flexíveis, a teoria viscosa se encaixa melhor. Apesar de não poder explicar como o mecanismo funciona perfeitamente, a técnica de redução de arraste é utilizada em várias áreas. É evidente que a adição de aditivos vem sendo utilizada há algum tempo e pode ajudar a resolver problemas em diversas áreas, uma vez que oferece grandes vantagens econômicas e uma maior eficiência no transporte de líquidos. Entretanto, para os aditivos poliméricos, a maior limitação é a degradação mecânica quando sujeitos a altas taxas de cisalhamento [27].

A degradação polimérica se tornou uma das principais questões a serem estudadas nas aplicações

comerciais da redução de arraste pela adição de polímeros e alguns parâmetros vem sendo estudados por diversos autores [9, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]. Através de experimentos, foi verificado, que a qualidade do solvente é muito importante no processo de degradação mecânica e foram observadas as seguintes conclusões; (1) Para condições iguais do escoamento com baixas tensões de cisalhamento, a degradação mecânica foi observada em um solvente ruim, enquanto o mesmo não pôde ser visto em um solvente bom; (2) Em condições em que ocorra a degradação em ambos os solventes, no solvente ruim ocorre mais rapidamente; e (3) No solvente ruim a taxa de degradação não depende tanto da concentração quanto no solvente bom [32]. Continuando nessa linha de estudo, Moussa e Tiu [33] perceberam que apesar da redução de arraste aumentar com o número de Reynolds, o mesmo intensifica a degradação mecânica, porém, o aumento da concentração e da massa molecular deixam a solução mais resistente. Kim *et al.* [28] também mostraram o efeito da qualidade do solvente quando o polímero é submetido à degradação e que a redução de arraste diminui com o tempo devido a mesma. Vanapalli *et al.* [35] chegaram à mesma conclusão, que o aumento da massa molecular e da concentração diminuem a degradação, ou seja, torna a solução mais resistente. Outros autores estudaram a degradação polimérica em um circuito fechado de tubulações circulares com auxílio de um pistão pneumático para transporte do fluido [56, 57, 58] e de uma bomba centrífuga [59] e chegaram a conclusão que o aumento do número de passes, isso é, da quantidade de vezes que a solução polimérica passa através do circuito, aumenta a degradação. Outros trabalhos recentes estudam o efeito do peso molecular, número de Reynolds, concentração de aditivo, qualidade do solvente e temperatura na redução de arraste [9, 34, 36]. Sohn. *et al.* [34] investigam o efeito desses parâmetros utilizando goma xantana, enquanto Pereira e Soares [9] e Pereira *et al.* [36] utilizam três polímeros diferentes, dois flexíveis (óxido de polietileno e poliacrilamida) e um rígido (goma xantana).

Todos os trabalhos citados anteriormente utilizaram tubos circulares ou uma geometria rotativa para avaliar a redução de arraste. Os trabalhos com anulares são antigos, porém poucos estudam o fenômeno. O estudo de escoamentos axiais em espaços anulares já ocorre há mais de um século, porém, os primeiros trabalhos apresentavam inconsistências com grandes incertezas nas correlações apresentadas [20]. Há quase setenta anos atrás Rothfus *et al.* [20] estudaram o perfil de velocidades e o fator de atrito em um espaço anular através da utilização do conceito de um diâmetro hidráulico apresentando correlações para ambos. Mais tarde, Walker e Rothfus [21] realizaram uma pesquisa experimental sobre como se comporta o padrão de transição do

perfil de velocidades entre os regimes laminar e turbulento. Meter e Bird [22] utilizaram uma aproximação do comprimento misto de Prandtl para chegar a uma expressão para o fator de atrito em função do número de Reynolds para espaços anulares. A expressão previa os fatores de atrito com uma boa precisão para os dados experimentais disponíveis na época e, ainda, os resultados eram mais precisos quando comparados ao método do diâmetro hidráulico. A equação era definida por uma função da razão de raios e pela distância adimensional até o ponto onde ocorre a velocidade máxima do escoamento, entretanto os resultados apresentavam diferenças entre o tubo circular e o espaço anular. Macagno e McDougall [23] sugeriram um método capaz de comparar o coeficiente de atrito de um tubo com o de um anular, tanto para superfícies lisas, quanto rugosas. Os resultados apresentados pelos autores não utilizam a aproximação baseada nas propriedades do escoamento laminar e prevê com uma boa precisão uma enorme quantidade de dados experimentais para várias razões de raios. Por outro lado, Jones Jr. e Leung [24] acreditam que não é necessário uma outra aproximação e pode-se utilizar as propriedades do escoamento laminar para definir o número de Reynolds do escoamento turbulento em muitas situações, como acontece no caso do tubo circular onde o número de Reynolds é o mesmo para ambos os regimes laminar e turbulento. Os resultados encontrados utilizando as equações propostas pelos autores apresentaram uma dispersão menor que, aproximadamente, $\pm 5\%$ quando comparados aos métodos de Rothfus *et al.* [20] e Macagno e McDougall [23]. Os autores apresentaram um número de Reynolds modificado que é baseado em uma dimensão característica do anular e se aplica a todas as razões de raios, de zero até a unidade.

Enquanto há vários estudos sobre como relacionar os dados do coeficiente de atrito e número de Reynolds para o espaço anular, como citado anteriormente, poucos trabalhos em si estudam a redução de arraste nesta geometria. Rubin e Elata [25] realizaram testes experimentais em um sistema composto por um espaço anular utilizando soluções de querosene e borracha de etileno-propileno com concentrações de 200, 400 e 800 *ppm* e de opanol com concentração de 800 *ppm*. Nesse trabalho os autores não compararam as geometrias, mas apenas utilizaram relações semiempíricas para expressar as variações no perfil de velocidades devido ao polímero dissolvido tanto no tubo circular, quanto no espaço anular. Hoffman *et al.* [26] estudou o escoamento axial em espaço anular utilizando soluções de carboximetilcelulose e água com concentrações de 0,05 % à 0,5 %. Os autores definiram o número de Reynolds e o fator de atrito como o mesmo usado no regime laminar e observaram apenas a influência do aumento de concentração. A revisão mostra a existência de um número restrito de trabalhos que estu-

dam a redução de arrasto em espaços anulares que é a proposta do problema abordado nesta dissertação, cujos detalhes estão na próxima seção.

1.3 Caracterização do Problema

Este trabalho estuda o fenômeno de redução de arraste em espaços anulares e tubos circulares utilizando polímeros rígidos e flexíveis de alto peso molecular e compara os resultados obtidos em termos de redução de arraste e da degradação polimérica. Para isso, utiliza-se uma bancada experimental que é constituída de tubulações estreitas retas por onde é conduzida a solução de teste. A solução é deslocada por uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal. Além disso, um medidor de vazão do tipo eletromagnético é instalado na linha e as pressões são medidas através de dois medidores de pressão estática. Quatro termopares são instalados no circuito para monitorar a temperatura do fluido. São estudadas soluções aquosas de Goma Xantana (XG) e Óxido de Polietileno (PEO) e Poliacrilamida (PAM). Para cada polímero é utilizada apenas uma massa molecular, porém com concentrações de 25, 50, 100 e 200 partes por milhão. Além disso, são testadas quatro geometrias, sendo elas, um tubo circular e três espaços anulares diferentes. Todos os espaços anulares são obtidos através da mudança da barra circular que se encontra no centro do tubo.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão mostradas algumas equações de extrema importância em mecânica dos fluidos, assim como todas as equações importantes para o problema estudado em questão

2.1 Parâmetro Para Comparação dos Resultados

Para comparar os resultados de um tubo com os de um espaço anular, deve-se utilizar um parâmetro de referência. O parâmetro mais importante de escoamentos em dutos é o número de Reynolds. O número de Reynolds para escoamentos de fluidos newtonianos em tubos circulares é muito bem definido, como mostra a Eq. (2.1), onde D é o diâmetro hidráulico do tubo que, por sua vez para o tubo, é o próprio diâmetro interno.

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} \quad (2.1)$$

Partindo da Eq. (2.1) e substituindo o diâmetro hidráulico do anular ($D_o - D_i$) chega-se à Eq. (2.2), onde D_o é o diâmetro interno do tubo e D_i é o diâmetro externo da barra redonda.

$$Re = \frac{\rho \bar{u} (D_o - D_i)}{\mu} \quad (2.2)$$

Muitos dados experimentais para a queda de pressão em espaços anulares concêntricos lisos existem na literatura e caso seja utilizada a Eq. (2.2) para correlacionar estes dados com a equação de Colebrook, os resultados apresentam uma dispersão de -25% a $+35\%$ [24]. Isso acontece porque a Eq. (2.2) não preserva, necessariamente, sua definição original. Jones Jr e Leung [60] demonstraram que utilizar o diâmetro hidráulico para correlacionar os dados em uma geometria retangular em um escoamento turbulento era impreciso e é sabido que o diâmetro hidráulico também é insuficiente para relacionar os dados para o espaço anular [61]. Para evitar isso, é utilizada a definição geral do número de Reynolds como mostrado na Eq. (2.3). Essa definição também é utilizada por Thompson e Soares [62], onde o mesmo dilema existe quando se está lidando com fluidos não newtonianos.

$$Re = \frac{8\rho\bar{u}^2}{\tau_w} \quad (2.3)$$

Partindo da definição geral, Eq. (2.3), e encontrando uma relação entre a velocidade média \bar{u} e a tensão de cisalhamento na parede τ_w é possível chegar à uma nova expressão similar à Eq. (2.1), porém, substituindo o diâmetro interno do tubo por uma dimensão característica.

$$Re = \frac{\rho\bar{u}D_c}{\mu} \quad (2.4)$$

A dimensão característica pode ser encontrada através da solução das equações da Continuidade e da Quantidade de Movimento, obtendo-se, assim, a velocidade média e a tensão de cisalhamento na parede para o tubo circular e o espaço anular.

Vale notar que todo equacionamento é feito utilizando a hipótese de escoamento laminar, porém, neste trabalho o escoamento é turbulento. Acredita-se que não é necessário utilizar uma nova definição do número de Reynolds para o regime turbulento em um espaço anular, assim como ocorre no caso do tubo circular [24].

2.2 Tubo Circular

Para determinar o perfil de velocidades do escoamento é necessário resolver a Equação de Cauchy na direção em que o mesmo acontece, a direção axial. Na literatura [63, 64, 65] o perfil de velocidades para um tubo circular é bem conhecido, Eq. (2.5), assim como a velocidade média, Eq. (2.6) e a tensão de cisalhamento na parede, Eq. (2.7)

$$v_z = -\frac{dp}{dz} \frac{R_o^2}{4\mu} \left[1 - \left(\frac{r}{R_o} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{\pi R_o^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_o} v_z r dr d\theta = -\frac{dp}{dz} \frac{R_o^2}{8\mu} \quad (2.6)$$

$$\tau_w = -\frac{dp}{dz} \frac{R_o}{2} \quad (2.7)$$

Em posse das Eq. (2.6) e (2.7) e substituindo-as na Eq. (2.3) é possível determinar o número de Reynolds para o tubo circular. A Eq. (2.8) mostra o resultado encontrado.

$$Re_{tubo} = \frac{\rho \bar{v}_z D_o}{\mu} \quad (2.8)$$

Onde a dimensão característica do tubo, $D_{c,tubo}$ é o próprio diâmetro interno D_o .

2.3 Espaço Anular

Da mesma forma, precisamos determinar o perfil de velocidades e a tensão de cisalhamento na parede no espaço anular para poder determinar o número de Reynolds

A Figura (2.1) mostra um esquema de um espaço anular qualquer, onde as linhas sólidas representam as paredes fixas. O espaço anular é formado pela inserção de uma barra circular

através do tubo e o escoamento acontece entre a barra circular, com raio R_i e o tubo, com raio R_o , como mostrado na figura. Esta barra circular pode estar centralizada, formando um espaço anular concêntrico, ou não, podendo assim formar um espaço anular excêntrico. Neste caso, iremos analisar um espaço anular concêntrico.

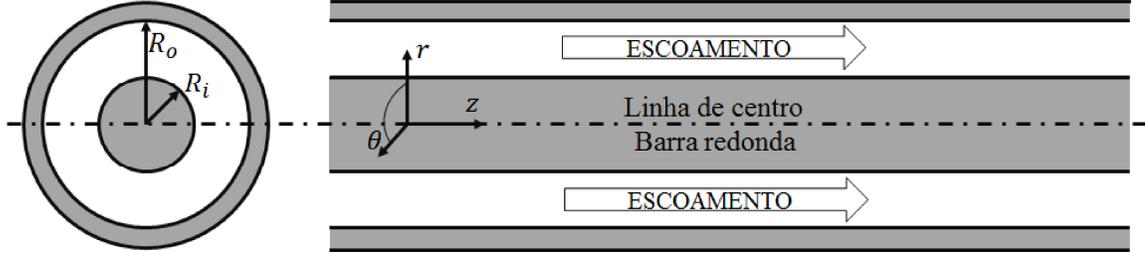


Figura 2.1: Esquema em duas dimensões de um espaço anular qualquer.

Resolvendo a Equação da Continuidade e de Cauchy em coordenadas cilíndricas com as devidas condições de contorno, chega-se ao perfil de velocidades para o espaço anular Eq. (2.9) e a velocidade média é encontrada dividindo-se a vazão pela área da seção transversal por onde o escoamento passa, Eq. (2.10).

$$v_z = -\frac{dp}{dz} \frac{1}{4\mu} \left(\frac{R_o^2 - R_i^2}{\ln(R_o/R_i)} \ln(r/R_i) + R_i^2 - r^2 \right) \quad (2.9)$$

$$\bar{v}_z = \frac{1}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \int_0^{2\pi} \int_{R_i}^{R_o} v_z r dr d\theta = -\frac{dp}{dz} \frac{1}{4\mu} \left[\frac{R_o^2 - R_i^2}{\ln R_o/R_i} + \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} - R_o^2 \right] \quad (2.10)$$

A Figura (2.2) mostra um esquema das forças que atuam no volume de controle especificado. Como há a presença de duas paredes no escoamento, devemos encontrar uma tensão de cisalhamento média. Isso é possível realizando um balanço de forças, Eq. (2.11).

$$\left[p - \left(p + \frac{dp}{dz} dz \right) \right] \pi(R_o^2 - R_i^2) = \tau_{w,o}(2\pi R_o dz) + \tau_{w,i}(2\pi R_i dz) \quad (2.11)$$

Depois de algum algebrismo, chegamos a uma expressão para a tensão média ponderada de cisalhamento nas paredes, Eq. (2.12).

$$\bar{\tau}_w = \frac{\tau_{w,o}R_o + \tau_{w,i}R_i}{(R_o + R_i)} = -\frac{dp}{dz} \frac{(R_o - R_i)}{2} \quad (2.12)$$

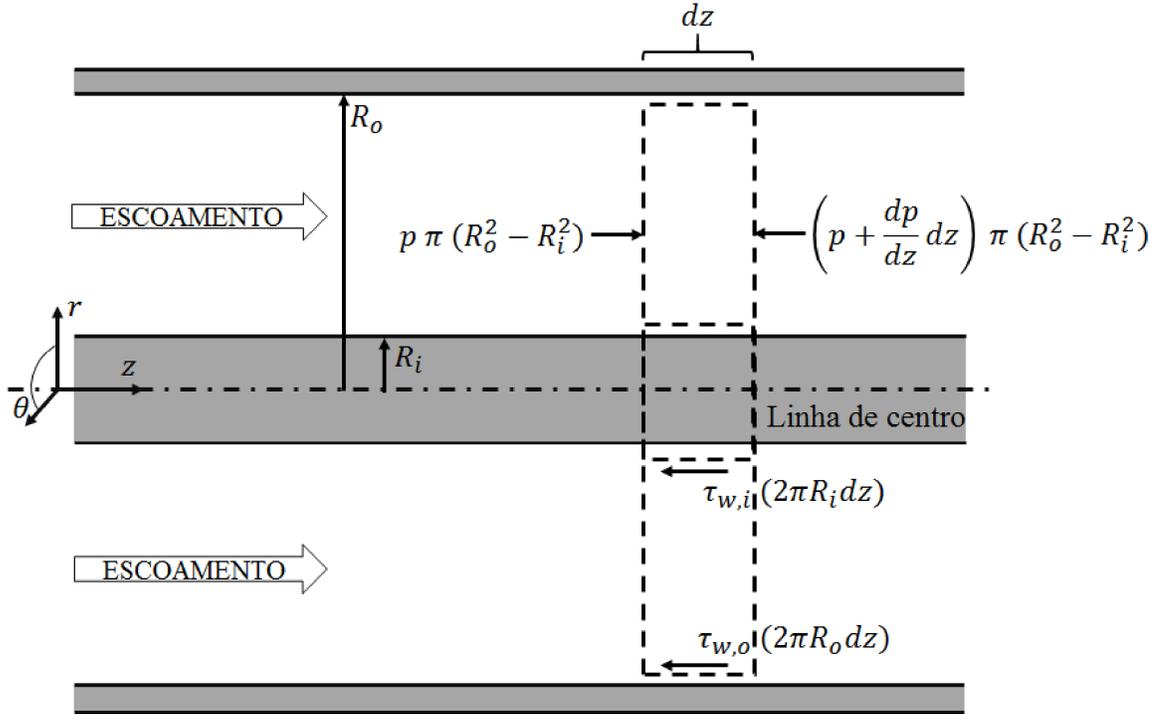


Figura 2.2: Esquema das forças que atuam no volume de controle para um espaço anular.

Em posse das Eq. (2.10) e (2.12) e substituindo-as na Eq. (2.3) é possível determinar o número de Reynolds para o espaço anular concêntrico e, assim, comparar os resultados com um tubo. A Eq. (2.13) mostra o resultado encontrado.

$$Re_{anular} = \frac{\rho \bar{v}_z}{\mu} \left[\frac{4R_o^2}{R_o - R_i} - \frac{4(R_o + R_i)}{\ln(R_o/R_i)} - 2(R_o + R_i) \right] \quad (2.13)$$

O termo entre colchetes é conhecido como a dimensão característica do espaço anular, $D_{c,anular}$. Podemos ainda escrever o número de Reynolds com base no diâmetro, sabendo que $d = 2r$. Dessa forma, chegamos à Eq. (2.14).

$$Re_{anular} = \frac{\rho \bar{v}_z}{\mu} \left[\frac{2D_o^2}{D_o - D_i} - \frac{D_o + D_i}{\ln(D_o/D_i)} - (D_o + D_i) \right] = \frac{\rho \bar{u}}{\mu} \left[\frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o - D_i} - \frac{D_o + D_i}{\ln(D_o/D_i)} \right] \quad (2.14)$$

Onde ρ é a massa específica (kg/m^3), μ é a viscosidade ($Pa.s$), \bar{v}_z é a velocidade média (m/s), D_o é o diâmetro interno do tubo (m) e D_i é o diâmetro externo da barra redonda (m). O termo entre colchetes é a dimensão característica do espaço anular.

Jones Jr. e Leung [24] chegaram à mesma expressão em seus estudos, Eq. (2.16). Onde ϕ^* é o fator de forma, Eq. (2.15), e a é a razão de raios ($a = D_i/D_o$).

$$\phi^* = \frac{1}{(1-a)^2} \left[1 + a^2 - \frac{1-a^2}{\ln(1/a)} \right] \quad (2.15)$$

$$Re_{anular} = \frac{\rho \bar{v}_z (D_o - D_i) \phi^*}{\mu} = \frac{\rho \bar{v}_z}{\mu} \left[\frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o - D_i} - \frac{D_o + D_i}{\ln(D_o/D_i)} \right] \quad (2.16)$$

2.4 Fator de Atrito

Para validar a bancada experimental deve-se comparar o fator de atrito teórico com aquele obtido experimentalmente, no capítulo 3 será mostrado como isso é feito. Nesta seção serão descritas apenas as equações utilizadas para determinar esses fatores de atrito.

Uma vez que neste trabalho está sendo utilizado a mesma definição do número de Reynolds para ambas as geometrias estudadas, o fator de atrito teórico pode ser determinado pela correlação de Colebrook para tubos lisos, Eq. (2.17) [24].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \log_{10}(Re \sqrt{f}) - 0,8 \quad (2.17)$$

Para calcular o fator de atrito na bancada experimental é utilizada a definição geral de Darcy, Eq. (2.18).

$$f_{Darcy} = \frac{4\tau_w}{\frac{1}{2}\rho \bar{v}_z^2} \quad (2.18)$$

Fazendo a substituição da Eq. (2.12) na Eq. (2.18), chega-se à expressão para o fator de atrito experimental, Eq. (2.19), onde D é o diâmetro hidráulico. No caso do tubo, D é o próprio diâmetro interno D_o e para os espaços anulares é $(D_o - D_i)$.

$$f = \frac{2}{v_z^2} \frac{\Delta p D}{\ell \rho} \quad (2.19)$$

2.5 Tempo Adimensional

Para poder comparar os resultados com outros trabalhos disponíveis na literatura um parâmetro foi determinado a partir do tempo de ensaio e da vazão volumétrica. Este parâmetro foi chamado de tempo adimensional e nada mais é do que um meio de determinar a quantidade de vezes que a solução de teste passa através do circuito experimental. Como se trata de um sistema fechado, não sendo possível determinar de maneira exata quantas vezes toda a solução passa através do mesmo, como em [56, 57, 59], a Eq. (2.20) permite determinar, de uma maneira aproximada, esse valor. Onde Q é a vazão volumétrica, t_i é o instante de tempo analisado e V é o volume total inicial da solução.

$$t^* = \frac{Qt_i}{V} \quad (2.20)$$

Capítulo 3

ABORDAGEM EXPERIMENTAL

3.1 Montagem Experimental

A Figura (3.1) mostra a bancada experimental utilizada para determinar o fator de atrito. O experimento consiste de um circuito fechado com elementos e equipamentos que possuem funções específicas descritas a seguir. A solução de teste é vertida em um reservatório (1) que é utilizado para armazenamento do fluido. Nele estão instalados quatro termopares do tipo T que são usados para medir a temperatura do fluido a partir de uma média entre eles. O sinal de temperatura proveniente desses termopares é adquirido por uma placa de aquisição de dados NI 4351 com o objetivo de auxiliar o controle de temperatura do fluido presente no tanque. A temperatura do tanque é ajustada a partir do escoamento de um fluido secundário, proveniente de um banho termostático Lauda Proline RP1845, que flui por uma serpentina de cobre montada no interior do tanque. Para evitar a flutuação da interface líquido-ar no tanque e impedir a formação de bolhas de ar, a tubulação de retorno é inserida, aproximadamente, 30 *cm* no fluido presente no reservatório. A solução passa por um mangote hidráulico de duas polegadas (2") (2) com 1,5 metro de comprimento até chegar na sucção da bomba de deslocamento positivo Weatherford, modelo WHT40F (3). Um inversor de frequência CFW-08-RS-485 é utilizado para controlar a rotação do motor da bomba. A linha de teste possui dois acumuladores de pressão (4) que atuam para amortecer as pulsações no escoamento causadas pela bomba. Após o recalque, a solução é encaminhada para a seção de teste por uma mangueira de uma polegada (1") (5) com comprimento de 1,2 metro. É possível utilizar um sistema de *by-pass* (6) para realizar expe-

rimentos a baixos números de Reynolds sem comprometer o motor da bomba. O sistema de *by-pass* consiste em uma válvula instalada em um tê, o que permite parte da solução retornar para o tanque. O fluido passa pela mangueira de uma polegada e chega à seção de teste (7) onde as pressões estáticas são medidas. A seção de teste consiste em um tubo de $3/8''$ de diâmetro e 1,5 metro de comprimento. O tubo foi brunido e possui dez tomadas de pressão, sendo que apenas duas são utilizadas. As tomadas possuem furos com 2 mm de diâmetro e não interferem na medição de pressão. O brunimento foi sugerido por Silva, Klippel e Loureiro [66], onde o tubo brunido pode ser considerado um tubo liso, pois a rugosidade fica coberta pela subcamada laminar e não influencia no fator de atrito. Para medir as pressões, são utilizados dois transdutores de pressão Warme com 0,1% de incerteza do fundo de escala. Após a seção de teste, o fluido é encaminhado para uma seção vertical com 1,0 metro de comprimento onde é medida a vazão volumétrica.

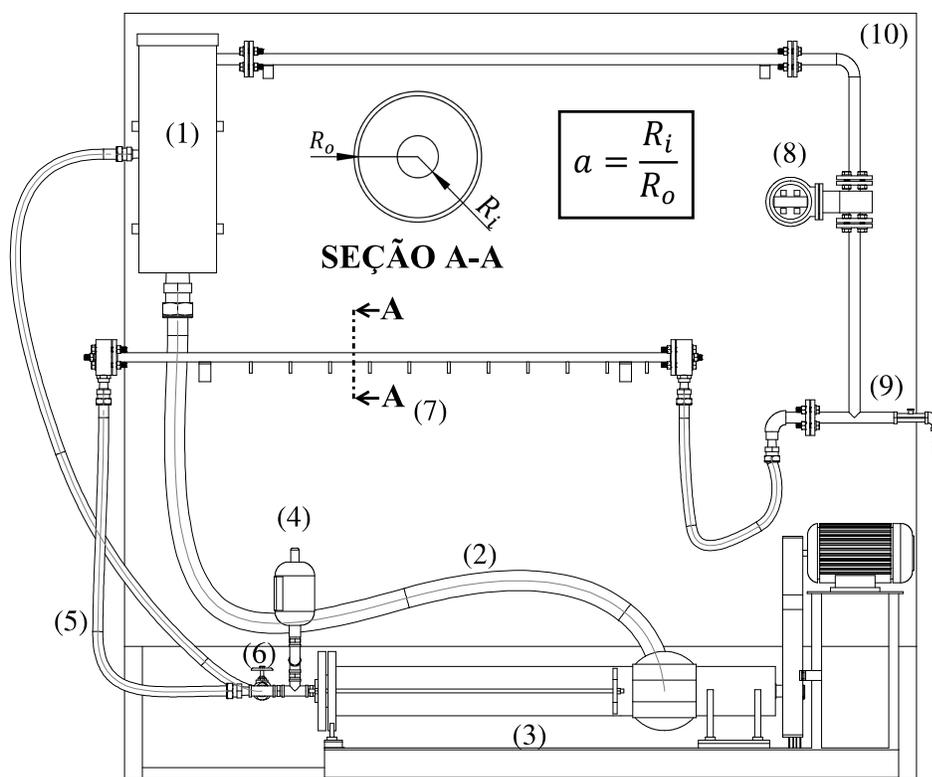


Figura 3.1: Esquema da bancada experimental montada com o espaço anular.

A vazão volumétrica é medida por meio de um medidor de vazão do tipo eletromagnético Ro-

semount série 8700 com precisão 0,15% com seção de 1/2" e, após isso, a solução retorna para o tanque através de uma tubulação com diâmetro de 1/2" e 1,5 metro de comprimento. Todo o circuito é isolado termicamente com uma espuma elastomérica. É importante notar, também, que os espaços horizontais e verticais são suficientes para garantir que o escoamento esteja desenvolvido na região de medição de pressão (7) e na região para medição de vazão (8). Conexões flangeadas são usadas para conectar os tubos e facilitar suas trocas. Uma amostra da solução de trabalho pode ser coletada para análises posteriores através de uma válvula após o trecho de medição (9). As tubulações são fixadas em uma placa de madeira (10) que, por sua vez, são fixadas em uma estrutura metálica móvel. O experimento é controlado por meio de um supervisorio desenvolvido sob a plataforma LabView 2010 e a comunicação é feita por uma rede industrial. A mesma bancada foi utilizada tanto para os testes com o tubo circular, como para o espaço anular, mudando-se apenas a seção de medição das pressão. A Figura (3.2) mostra os esquemas tridimensionais da bancada experimental com a montagem para o tubo circular (a) e para o espaço anular (b). Apenas o trecho de medição de pressão é modificado, região (7) da Fig. (3.1), mantendo todo o restante da montagem idêntica. Uma vantagem desta montagem em relação à utilizada por [57, 59] é a quantidade de amostra necessária para a realização do experimento e a possibilidade de mudança da geometria, porém, por manter o escoamento através de uma bomba do tipo helicoidal, não é possível determinar a taxa de degradação polimérica devido ao atrito da tubulação, uma vez que ao passar pela bomba, o polímero enfrenta altas taxas de cisalhamento. Isso será discutido no capítulo 4.

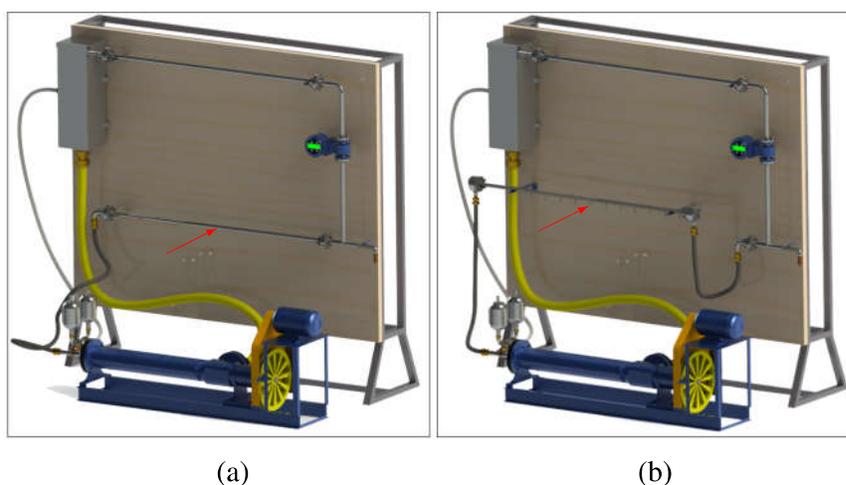


Figura 3.2: Esquema tridimensional da bancada experimental montada com o (a) tubo circular e com o (b) espaço anular.

3.2 Preparo e Tempo de Diluição das Amostras

Neste trabalho foram utilizados três polímeros que podem ser separados em duas classes, um rígido e dois flexíveis. A goma xantana (XG), polímero rígido, com peso molecular médio de $\overline{M}_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$, o óxido de polietileno (PEO), polímero flexível, com peso molecular de $M_v = 4,6 \times 10^6 \text{ g/mol}$, e a poliacrilamida (PAM), com peso molecular de $M_v = 5,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$. As massas moleculares do PEO e da PAM foram calculadas por Pereira e Soares [9] através do método da viscosidade intrínseca. Os três polímeros são fabricados pela Sigma-Aldrich[®]. A justificativa para estudo destes aditivos se dá, principalmente, pela sua significativa redução de arraste, como mostrado por outros autores [9, 29, 35, 36, 37, 67].

Para preparação das amostras, os polímeros (em pó) são depositados diretamente sobre a água da torneira, a 25 °C em quatro recipientes diferentes. Após a adição do polímero, os recipientes são lacrados e a mistura é feita por movimento browniano, ou seja, pelo movimento aleatório das moléculas e sem agitação de uma fonte externa. A utilização de água da torneira é explicada devido ao princípio de medição do medidor de vazão do tipo eletromagnético, uma vez que depende da condutividade do fluido. O fenômeno é menos evidente nesse solvente quando comparado à água deionizada como indicam os resultados de Sandoval [59], isso pode ser explicado pelo fato da água deionizada não possuir íons livres que poderiam interagir com o polímero, como acontece na água da torneira. Os resultados utilizando a água da torneira, que serão apresentados a seguir, mostram, ainda, uma significativa redução de arraste.

Através de alguns testes realizados na bancada foi possível descobrir o tempo ideal para garantir a mistura homogênea de cada aditivo. As Figuras (3.3), (3.4) e (3.5) mostram os resultados dos testes para a XG, PEO e PAM, respectivamente, onde a abscissa mede o tempo adimensional e a ordenada a redução de arraste. Assim, para garantir boa diluição no solvente em todos os ensaios, é utilizado um tempo de diluição de 48 horas para a XG e o PEO. Esse tempo também foi utilizado para as soluções de PEO por [9, 57, 59] e 72 horas para a PAM. A escolha destes tempos é explicada através das figuras.

As Figuras (3.3) e (3.4) mostram que para a XG e o PEO, respectivamente, não há mudança da redução de arraste após 48 horas de diluição, enquanto para as soluções com PAM, Fig. (3.5), este tempo é de 72 horas, uma vez que a diferença da redução de arraste máxima, em $t^* = 1$, entre 72 e 96 horas é menor que 2 %.

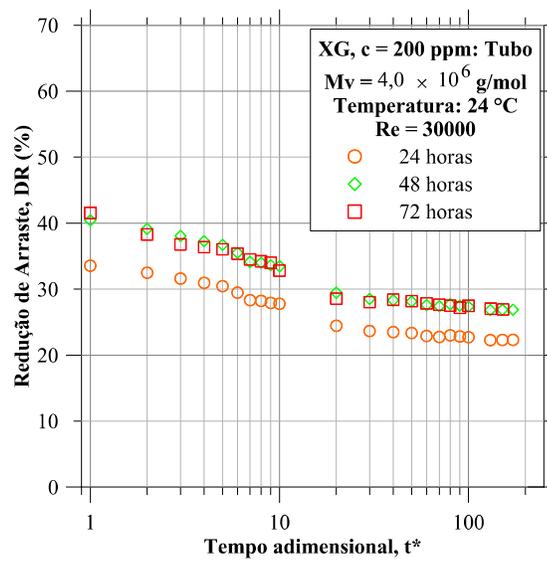


Figura 3.3: Testes de diluição da goma xantana utilizando água da torneira.

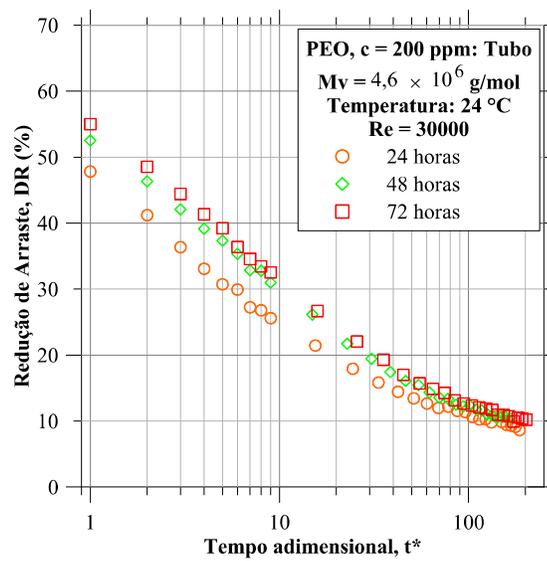


Figura 3.4: Testes de diluição do óxido de polietileno utilizando água da torneira.

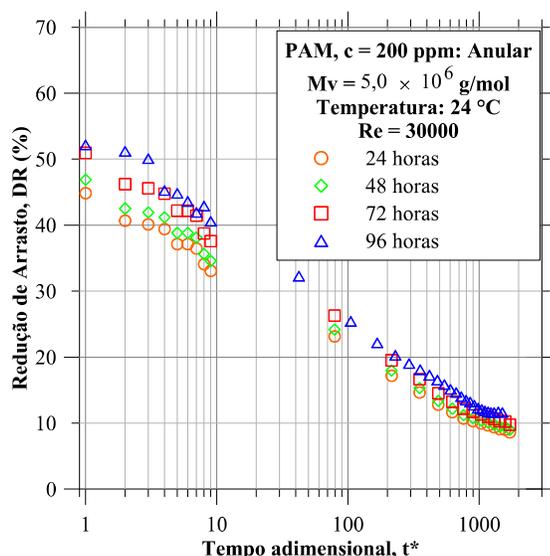


Figura 3.5: Testes de diluição da poliacrilamida utilizando água da torneira.

3.3 Condição de Estoque das Amostras

Como deve-se esperar a diluição completa dos aditivos no solvente é necessário estocar as amostras de forma a não ter nenhuma outra influência externa. Alguns fatores importantes são a temperatura, a luz e o contato com o ar ambiente [68]. Acredita-se que o aumento significativo da temperatura pode acelerar o processo de degradação biológica do polímero, assim como o contato com o ar e a exposição à luz. Para isso, as amostras são armazenadas em quatro recipientes opacos com capacidade de cinco litros e lacrados até o instante de início do teste em local apropriado, onde a temperatura média do ambiente não ultrapassa 26 °C.

3.4 Descrição dos Experimentos

3.4.1 Validação da bancada experimental

Antes de iniciar os testes com os polímeros, o primeiro passo a ser tomado é avaliar a efetividade da bancada experimental e, desta forma, ganhar a confiabilidade nos ensaios realizados. O

trecho de teste onde são tomadas as pressões do escoamento é um tubo de aço inoxidável com brunimento, similar àquele utilizado por [57, 58]. O tubo com brunimento pode ser considerado um tubo liso, pois a rugosidade fica coberta pela subcamada laminar e não influencia no fator de atrito. Para o espaço anular, uma barra redonda de aço inoxidável é inserida no interior do tubo. A Tabela (3.1) mostra a relação dos diâmetros dos tubos e das barras redondas utilizadas para formar os espaços anulares, onde a é a razão de raios, como mostra a Fig. (3.6). O experimento para avaliação da bancada é realizado utilizando vinte litros de água. A água é escoada pela tubulação fazendo-se uma varredura no número de Reynolds. Testa-se uma faixa de Reynolds entre 10.000 e 100.000. Os ensaios são realizados mantendo-se a vazão constante durante dois minutos e, então, muda-se a rotação da bomba. A diferença de pressão é medida na seção de teste onde o escoamento é desenvolvido e o fator de atrito é calculado pela definição de Darcy. A temperatura média durante o teste é 24 °C.

Após o experimento, uma série de dados experimentais são obtidos. Com esses dados uma expressão para descrever o fator de atrito experimental da bancada em função do número de Reynolds é obtida. Posteriormente a expressão é utilizada para calcular o fator de atrito do solvente e então a redução de arraste. Para a validação, os dados experimentais são comparados com os valores obtidos pela correlação de Colebrook para tubos lisos, Eq. (2.17).

Tabela 3.1: Relação dos diâmetros de tubos e barras redondas utilizadas na bancada experimental.

Geometria	Tubo Diâmetro (mm) D_o	Barra redonda Diâmetro (mm) D_i	Razão de raios a
Tubo circular	13,7525	0	0
Anular		3,1750	0,2310
Anular	13,7525	4,8200	0,3505
Anular		7,9200	0,5759

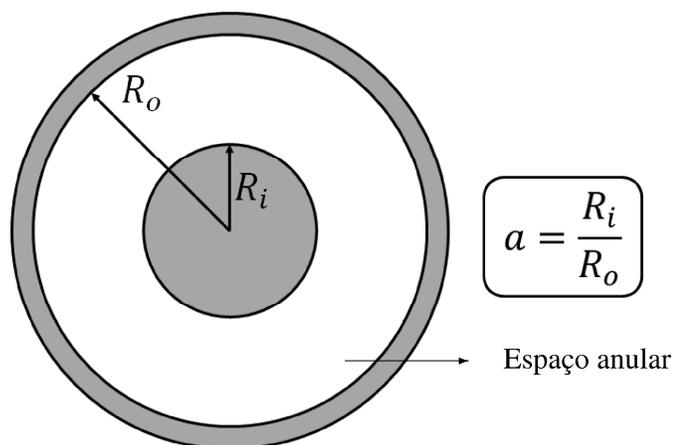


Figura 3.6: Esquema mostrando o que é a razão de raios, a .

Os resultados a seguir, Fig. (3.7), mostram a validação das geometrias utilizadas com água como o fluido de trabalho. A abscissa é o número de Reynolds e a ordenada o fator de atrito pela definição de Darcy. A linha sólida azul representa o fator de atrito para o regime laminar, $f = 64/Re$, a linha tracejada é a correlação de Colebrook para tubo liso, Eq. (2.17) e a linha preta é a assíntota de Virk, Eq. (1.5).

Fazendo a comparação do fator de atrito experimental com o teórico obtém-se a dispersão mostrada na Tab. (3.2). As dispersões são consideradas aceitáveis para a proposta deste trabalho. Analisando separadamente cada geometria, os resultados de diferentes ensaios são consideravelmente próximos, o que confirma a estabilidade da bancada e a repetibilidade dos experimentos. Para todos os dados experimentais é possível observar a proximidade com a correlação de Colebrook. Além disso, é possível observar que, como discutido por Jones Jr. e Leung [24] e Thompson e Soares [62], a definição correta do número de Reynolds permite a completa equivalência geométrica entre tubos circulares e espaços anulares para os regimes laminar e turbulento.

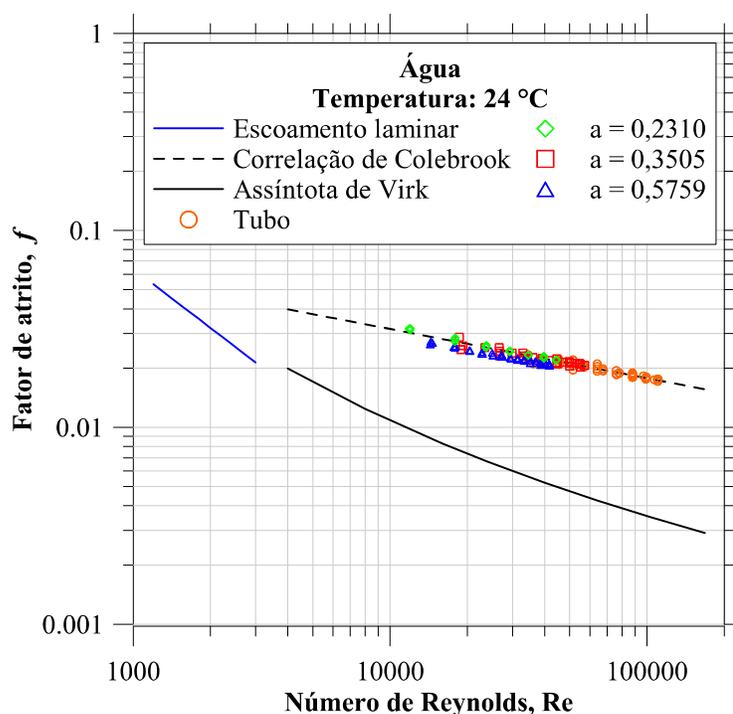


Figura 3.7: Resultado das validações de todas as geometrias usadas com base na definição geral do número de Reynolds.

Tabela 3.2: Diferença entre o fator de atrito experimental e o calculado pela correlação de Colebrook para a análise utilizando a definição geral do número de Reynolds.

Geometria	Razão de raios, a	Dispersão máxima (%)	Dispersão na região de trabalho (%)
Tubo	0	5	2
Anular	0,2310	5	1
Anular	0,3505	3	2
Anular	0,5759	6	5

Caso a Eq. (2.2) obtém-se os resultados da Fig. (3.8). Através dos valores de dispersão mostrados na Tab. (3.3) fica clara a importância da definição correta do número de Reynolds. Como comentado anteriormente, isso já era previsto por Jones Jr. e Leung [24]. Os resultados para o tubo apresentam as mesmas dispersões nos dois casos, pois o diâmetro característico dele é

igual ao diâmetro hidráulico (o próprio diâmetro interno).

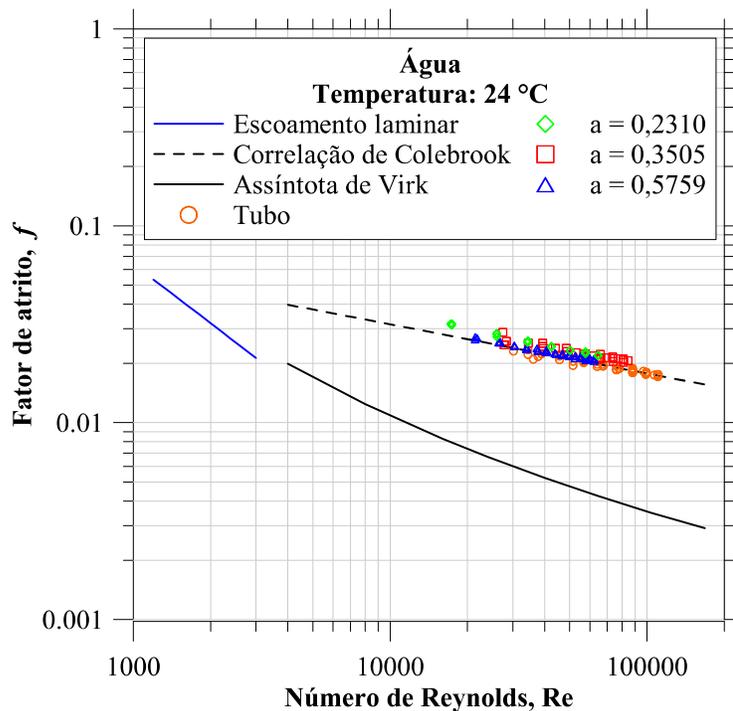


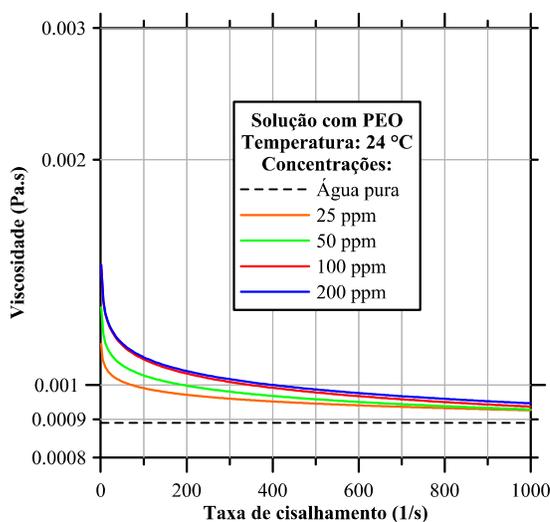
Figura 3.8: Resultado das validações de todas as geometrias usadas com base na definição do número de Reynolds utilizando o diâmetro hidráulico.

Tabela 3.3: Diferença entre o fator de atrito experimental e o calculado pela correlação de Colebrook para a análise utilizando o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico.

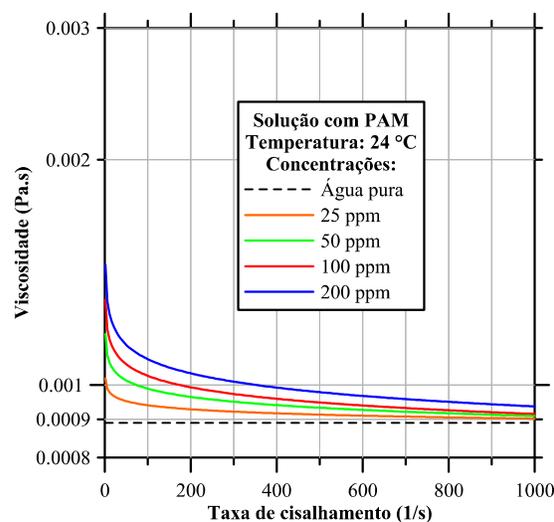
Geometria	Razão de raios, a	Dispersão máxima (%)	Dispersão na região de trabalho (%)
Tubo	0	5	2
Anular	0,2310	14	10
Anular	0,3505	16	9
Anular	0,5759	6	5

3.4.2 Ensaios com as soluções poliméricas

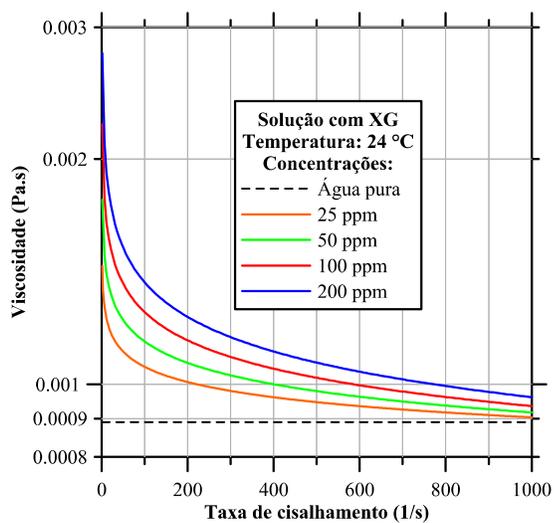
Os testes foram realizados com os polímeros já citados com concentrações de 25 a 200 *ppm* diluídos em água. Após a preparação da amostra, a massa específica é obtida por meio do método de picnometria a 24 °C em um picnômetro calibrado e a reologia em um reômetro AntonPaar Physica MCR 501 utilizando uma geometria rotativa formada por dois cilindros concêntricos com dupla folga (*Double Gap C-DG42*). Esse é o mesmo equipamento utilizado por [57]. Esta geometria é similar à utilizada por Pereira e Soares [9] e Pereira *et al.* [36] e Bizotto e Sabadini [69]. Devido à grande área de contato da geometria com o fluido é possível obter resultados com boa exatidão para soluções que apresentam baixa viscosidade a altas taxas de deformação. As Figuras (3.9a), (3.9b) e (3.9c) mostram as curvas de viscosidades das soluções utilizadas, onde o eixo da ordenada é a viscosidade cisalhante e a abscissa a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) à temperatura de 24 °C. As Tabelas (3.4), (3.5) e (3.6) mostram os valores de viscosidade cisalhante e massa específica para a XG, PEO e PAM, respectivamente, utilizados para o cálculo do fator de atrito e do número de Reynolds. Por apresentarem um comportamento pseudoplástico a baixas taxas de cisalhamento, as soluções poderiam ser consideradas como um fluido não newtoniano. Porém, como a redução de arraste é um fenômeno de parede e, ali, as taxas de cisalhamento são elevadas, a viscosidade escolhida para os cálculos é a da região assintótica da curva de escoamento em $\dot{\gamma} \approx 1000$.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.9: Viscosidade das soluções com (a) PEO, (b) PAM e (c) XG.**Tabela 3.4:** Propriedades das soluções com o polímero XG.

Polímero	Concentração (ppm)	Viscosidade Cisalhante (mPa.s)	Massa específica (kg/m³)
XG	25	0,903	998,69
	50	0,913	
	100	0,937	
	200	0,945	

Tabela 3.5: Propriedades das soluções com o polímero PEO.

Polímero	Concentração (ppm)	Viscosidade Cisalhante (mPa.s)	Massa específica (kg/m³)
PEO	25	0,903	998,46
	50	0,904	
	100	0,925	
	200	0,937	

Tabela 3.6: Propriedades das soluções com o polímero PAM.

Polímero	Concentração (ppm)	Viscosidade Cisalhante (mPa.s)	Massa específica (kg/m ³)
PAM	25	0,900	998,47
	50	0,903	
	100	0,912	
	200	0,927	

Os resultados mostram que o incremento da concentração de polímero no solvente aumenta também a viscosidade cisalhante. Vale notar que a XG, apesar de ter um peso molecular médio menor, é a que apresenta maior valor de viscosidade para as concentrações utilizadas.

Após a caracterização do fluido, a solução é inserida no reservatório de aço inoxidável e a bomba do tipo helicoidal é escorvada manualmente para minimizar os efeitos da degradação mecânica. Após a escorva, o ensaio é realizado mantendo a vazão constante. A solução é bombeada através do circuito e passa pela seção de teste onde existem tomadas de pressão estática. Em seguida é feita a medição de vazão antes do fluido retornar para o reservatório inicial. Como comentado anteriormente, não é possível determinar a quantidade exata de vezes que a solução passa através do circuito, pois há a mistura com a solução que permanece no interior do reservatório. Assim utiliza-se uma estimativa que é o tempo adimensional. O reservatório é ligado à sucção da bomba por um mangote hidráulico de duas polegadas (2") e o recalque é ligado à seção de teste por um mangote hidráulico de uma polegada (1") para minimizar a degradação do polímero. O tempo de ensaio varia de acordo com o polímero e concentração utilizada.

Nos ensaios são coletados dados de pressão, temperatura e vazão volumétrica. Com esses parâmetros e em posse das Eqs. (2.19) e (2.20) é possível analisar a redução de arraste. Os resultados são mostrados no capítulo 4.

3.5 Análise de Incertezas

Para obter um entendimento ainda maior do fenômeno estudado é importante conhecer as incertezas experimentais relacionadas à medição de cada variável e isso pode ser feito através da análise de incertezas. Nesta seção serão mostrados os tipos de incertezas e o cálculo das mesmas.

As incertezas podem ser divididas em dois grupos baseados no método de avaliação, “A” e “B”. Para o tipo A, a avaliação deve ser baseada em métodos estatísticos para tratamento dos dados, enquanto para o tipo B a avaliação é baseada em julgamentos científicos, como por exemplo medições anteriores [71, 70]. Na maioria dos casos, o que se deseja conhecer não é medido diretamente, mas determinado a partir de outros fatores. Como exemplo, podemos expressar o fator de atrito experimental (f) como uma relação com a queda de pressão (Δp), a distância entre os pontos em que são medidas as pressões (ℓ), o diâmetro do tubo (D), a massa específica (ρ) e a velocidade média do escoamento ($\overline{v_z}$), Eq. (3.1).

$$f = \phi(\Delta p, \ell, D, \rho, \overline{v_z}) \quad (3.1)$$

e por sua vez, a velocidade ($\overline{v_z}$) é uma função ϕ da vazão volumétrica (Q) e do diâmetro interno do tubo (D), Eq. (3.2)

$$\overline{v_z} = \phi(Q, D) \quad (3.2)$$

Em geral, devido às incertezas associadas a cada medição, os resultados medidos podem ser expressos em uma quantidade x como mostra a Eq. (3.3), onde δ_x , por conveniência, é chamado de incerteza [70].

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \delta_x \quad (3.3)$$

Ainda é comum expressar o valor medido x em termos do percentual de incerteza multiplicando a incerteza relativa (δ_x/x) por 100, $(\delta_x/x) \times 100$, como mostra a Eq. (3.4).

$$(\text{valor medido de } x) = x \pm \left(\frac{\delta_x}{x} \right) (\%) \quad (3.4)$$

É possível escrever o fator de atrito na forma da Eq. (3.4), onde a incerteza relativa do fator de atrito pode ser determinada usando o método das séries de Taylor [72] Eq. (3.5).

$$y_f = \left(\frac{\delta_f}{f} \right) = k \left[\left(\frac{\Delta p}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta p} \right)^2 \left(\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \left(\frac{\ell}{f} \frac{\partial f}{\partial \ell} \right)^2 \left(\frac{\delta_\ell}{\ell} \right)^2 + \left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D} \right)^2 \left(\frac{\delta_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\delta_\rho}{\rho} \right)^2 + 2 \left(\frac{\bar{v}_z}{f} \frac{\partial f}{\partial \bar{v}_z} \right)^2 \left(\frac{\delta_{\bar{v}_z}}{\bar{v}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Onde k é o fator de abrangência e os termos $\left(\frac{\Delta p}{f} \frac{\partial f}{\partial \Delta p} \right)$, $\left(\frac{\ell}{f} \frac{\partial f}{\partial \ell} \right)$, $\left(\frac{D}{f} \frac{\partial f}{\partial D} \right)$, $\left(\frac{\rho}{f} \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)$ e $\left(\frac{\bar{v}_z}{f} \frac{\partial f}{\partial \bar{v}_z} \right)$ são conhecidos como fatores de ampliação da incerteza para a diferença de pressão, comprimento, diâmetro hidráulico, massa específica e velocidade média, respectivamente. Fazendo os devidos cálculos, considerando uma confiabilidade de 95 % ($k = 2$), encontra-se um percentual de incertezas para os fatores de atrito calculados para o tubo e os espaços anulares. A Tabela (3.7) mostra os resultados dos cálculos realizados.

Tabela 3.7: Resultados dos cálculos da análise de incertezas para o fator de atrito.

Geometria	Razão de raios	$(\delta_f/f)_{(\%)}$
	a	(%)
Tubo	0	0,7
Anular	0,2310	1,1
Anular	0,3505	1,2
Anular	0,5759	1,8

Capítulo 4

RESULTADOS

São avaliados os efeitos da concentração, do tipo de polímero e da geometria. Para analisar a redução de arraste os resultados são apresentados em função do tempo adimensional definido no capítulo 2. As concentrações utilizadas para todos os polímeros são 25, 50, 100 e 200 *ppm*. Os números entre parênteses mostrados nas legendas dos resultados a seguir indicam repetições dos ensaios utilizando outras soluções preparadas da maneira indicada no capítulo 3.

4.1 Efeitos de Concentração e Tipo de Polímeros na Redução de Arraste

Todos os resultados mostrados nessa subseção são obtidos com o número de Reynolds fixo em 30.000. A partir desse ponto, a redução de arraste é mostrada em função do tempo adimensional para levar em conta o efeito da concentração, assim como o efeito de diferentes polímeros.

4.1.1 Tubo circular, $a = 0$

As Figuras (4.1) e (4.2) mostram o efeito da concentração das soluções com óxido de polietileno e com goma xantana, respectivamente, no tubo circular com diâmetro interno de 13,7525 *mm*. O número de Reynolds e a temperatura dos ensaios foram fixados em 30.000 e 24 °C. O efeito

da concentração foi analisado na faixa de 25 a 200 *ppm*. Como esperado, a eficiência da redução de arraste (DR_{max}) é uma função crescente da concentração (veja [29, 30, 31, 34, 9, 36]). A redução de arraste decai quando o tempo adimensional é incrementado até que seu valor mínimo é alcançado (DR_{min}) onde a degradação polimérica para e a distribuição do peso molecular alcança regime permanente. Isso é discutido por Pereira *et al.* [36]. Para as soluções com PEO, esse valor é, aproximadamente, $t^* = 150$ e com as soluções com XG, $t^* = 20$, principalmente com as concentrações mais baixas. Esses valores de t^* são equivalentes a um deslocamento do fluido de 750 metros e 100 metros, respectivamente. A solução com 25 *ppm* de PEO atingiu um valor de 4 % de redução de arraste no tempo adimensional $t^* = 400$. Tal valor aumenta para 5 % com 50 *ppm* e para 7 % com 100 *ppm*, e, finalmente, para 14 % com 200 *ppm*. A taxa de aumento da redução de arraste máxima diminui à medida que a concentração aumenta, o que é esperado, uma vez que o maior valor de DR é limitada pela lei de Virk, uma assíntota que delimita a máxima redução de arraste para polímeros (veja [29, 30, 31]). Uma vez que a vazão é fixa, a queda de pressão aumenta e, conseqüentemente, a redução de arraste diminui com o t^* como uma consequência da degradação dos polímeros. É importante notar, também, que a redução de arraste da solução mais concentrada de PEO (200 *ppm*) decai drasticamente do seu valor máximo de 56 % para o valor mínimo de 14 % como uma consequência da degradação do polímero ou desagregação das moléculas, como discutido por Soares *et al.* [58].

Vanapalli *et al.* [35] e Soares *et al.* [58] conduziram testes com soluções com PEO que possuía o peso molecular igual a $M_v = 5,0 \times 10^6$ g/mol. O valor de redução de arraste máxima obtido no presente trabalho com a solução com PEO diverge 25 % daqueles apresentados por Vanapalli *et al.* [35] e 20 % dos resultados de Soares *et al.* [58]. Para a região assintótica (DR_{min}), a redução de arraste apresenta uma diferença de 50 % dos resultados dos trabalhos citados. Os autores também verificaram a diminuição da eficiência da redução de arraste com o número de passes da solução na tubulação. A maior redução de arraste relatada por Vanapalli *et al.* [35] foi por volta de 75 % no primeiro passe. Soares *et al.* [58] mostraram uma redução de arraste de 70 %. Neste trabalho a redução de arraste máxima é 56 %. Conforme já relatado por Soares *et al.* [58], para efeito de comparação, após 36 metros de deslocamento do escoamento, obteve-se uma redução de arraste próxima a 50 %. Nesta bancada, esse deslocamento é equivalente à $t^* \approx 8$ e foi observada um DR de 39 %. Essa diferença se dá, principalmente, pela presença da bomba no presente trabalho. Isso acelera a degradação dos polímeros flexíveis e, conseqüentemente, o valor de DR encontrado será menor. Esse ponto será discutido mais adiante.

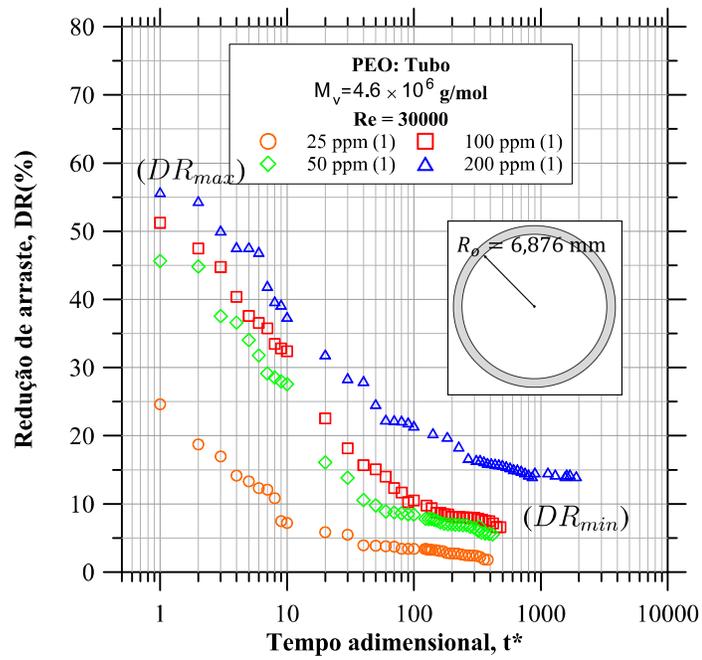


Figura 4.1: Efeito da concentração utilizando soluções com PEO no tubo circular ($a = 0$).

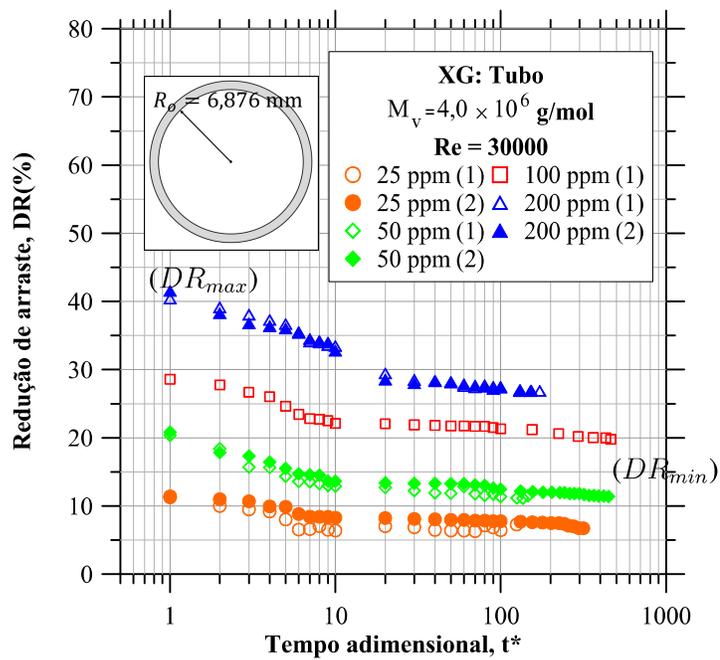


Figura 4.2: Efeito da concentração utilizando soluções com XG no tubo circular ($a = 0$).

A maneira que a redução de arraste se comporta com as soluções com XG é diferente daquela

com as soluções com PEO. A redução de arraste cai abruptamente até $t^* = 10$ e depois se mantém constante até o final do teste. O valor máximo de DR com a concentração de 200 ppm de XG, em $t^* = 1$, foi 42%, consideravelmente menor que aquele observado na solução com 200 ppm de PEO, que é por volta de 56%. Entretanto, o limite assintótico da solução com XG é superior, com valor por volta de 26%. Isso é discutido por Pereira *et al.* [36] e Soares *et al.* [58]. Os autores acreditam que a cisão polimérica não desempenha um papel importante nas soluções de XG e que a perda de eficiência inicial pode estar relacionada à desagregação polimérica, ao invés da degradação, como ocorre nas soluções com PEO. Consequentemente, a DR cai mais rapidamente para as soluções com XG. O patamar de mínima redução de arraste é alcançado com $t^* = 20$, enquanto para o polímero flexível é necessário, pelo menos, $t^* = 150$. Soares *et al.* [58] realizaram testes com XG com peso molecular igual a $M_v = 2,0 \times 10^6$ g/mol. As soluções com concentração de 200 ppm apresentaram uma redução máxima de 50% e depois caiu para 32%. A redução máxima obtida nesta bancada e a região assintótica apresentaram uma diferença de 18% daquela dos autores citados.

Essa diferença nos resultados apresentados nesse trabalho em relação àqueles da literatura pode ser explicada pela presença do sistema de bombeio utilizado para promover o escoamento, enquanto nos trabalhos citados o escoamento era feito através do deslocamento do líquido por meio de um pistão pneumático a fim de minimizar a degradação. Além disso, como é visto na literatura [29, 30, 31, 33], em maiores número de Reynolds a redução de arraste se torna mais evidente. No trabalho de Soares *et al.* os testes são realizados com número de Reynolds 62,5% maior que o deste trabalho. As Tabelas (4.1) e (4.2) mostram a taxa de degradação inicial para as soluções poliméricas com PEO e XG, respectivamente. A taxa de degradação inicial é calculada com base nos primeiros passes da solução pelo sistema, onde ocorre a maior degradação do polímero. Como é possível observar, o PEO apresenta uma taxa de degradação maior quando comparada à XG. Esses resultados estão de acordo com a literatura já citada. Além disso é possível fazer uma outra verificação levando em conta o aumento da concentração de aditivos. A princípio, os resultados apresentados nas Tabs. (4.1) e (4.2) são contra intuitivos, pois relatos mostram que o aumento da concentração torna a solução mais resistente à degradação [9, 33, 35, 36, 58] e neste trabalho ocorre o inverso, ou seja, a degradação da solução polimérica está aumentando com o incremento de concentração.

Tabela 4.1: Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no tubo.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de degradação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
PEO	25	1,65
	50	1,93
	100	2,08
	200	2,06

Tabela 4.2: Taxa de degradação inicial das soluções com XG no tubo.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de degradação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
XG	25	0,38
	50	0,69
	100	0,76
	200	0,78

Para tentar entender esse fenômeno vamos imaginar uma guilhotina no interior do escoamento que seja acionada sempre no mesmo intervalo de tempo, independente da concentração de aditivos no solvente. A Figura (4.3) mostra um esquema, onde o mecanismo central representa a guilhotina, as linhas grossas representam as paredes e as finas, as moléculas dos polímeros. Quando as soluções menos concentradas, caso (a), escoam e passam pela guilhotina, a mesma poderá atingir ou não os polímeros. Caso o intervalo que a guilhotina é acionada seja mantido e a concentração aumentada, caso (b), a probabilidade de uma molécula entrar em contato com a guilhotina e ter sua ligação quebrada aumenta. Supõe-se que seja isso o que aconteça no interior da bomba, que certamente impõe uma turbulência localizada grande. Com o aumento da concentração, a bomba interage muito mais com a solução, degradando-a ou desagregando-a. Assim, quanto mais concentrada é a solução, maior é a influência da bomba sobre a degradação. Acredita-se que a solução mais concentrada tenha um peso molecular médio menor que o da solução menos concentrada ao final do teste, devido a isso, o patamar onde ocorre a menor redução de arraste é tão próxima para todas as concentrações dos polímeros flexíveis. Vale notar que o mesmo é observado no polímero rígido, porém com menos influência. Esse resul-

tado também pode ser verificado no trabalho de Soares *et al.* [58]. Os autores observaram a influência de uma bomba centrífuga na redução de arraste para soluções de PEO, PAM e XG e chegaram à conclusão de que as moléculas de XG não são afetadas tão significativamente como as de PEO e PAM por apresentarem moléculas rígidas.

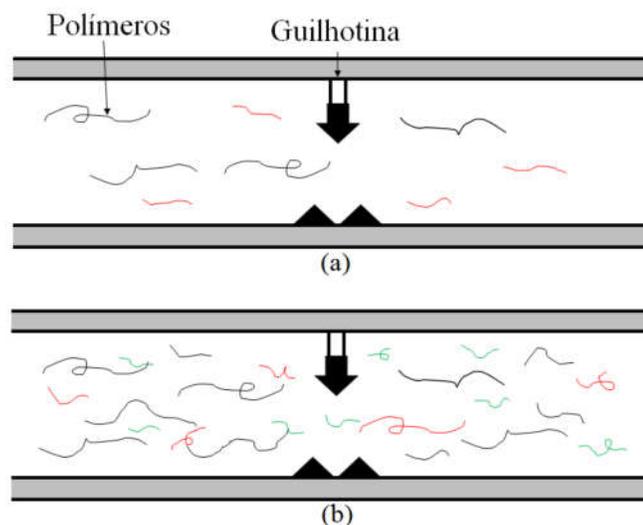


Figura 4.3: Esquema para explicar a degradação no interior da bomba.

4.1.2 Espaço anular, $a = 0,2310$

Os resultados de DR para o primeiro espaço anular são mostrados nas Figs. (4.4), (4.5) e (4.6) utilizando soluções com PEO, PAM e XG, respectivamente. Esse espaço anular é formado por um tubo com diâmetro interno de $13,7525\text{ mm}$ e uma barra redonda com diâmetro externo de $3,1750\text{ mm}$. Vale notar que os resultados apresentam a mesma tendência daqueles mostrados nas Figs. (4.1) e (4.2). A redução de arraste aumenta com o incremento de concentração do aditivo e cai com o aumento do tempo adimensional. A solução mais concentrada de PEO (200 ppm) apresenta um valor máximo de redução de arraste de 56% e chega no limite assintótico com DR por volta de 8% devido à degradação e desagregação, como já discutido anteriormente. Comparando esse valor com àqueles encontrados no tubo é possível verificar que a degradação é maior quando a solução é submetida ao escoamento no espaço anular, uma vez que apresenta um valor 43% menor nessa geometria. A solução com menor concentração de PEO (25 ppm) atingiu um limite assintótico de 4% , enquanto a mais concentrada (200 ppm) apresentou um

valor de 8%. Através desses valores é possível notar que o efeito da bomba é mais evidente nos resultados apresentados na Fig. (4.4). A região circulada chama a atenção por apresentar um resultado contra intuitivo. Isso já foi discutido nos resultados para o tubo. A Figura (4.5) mostra os resultados das soluções com PAM onde a DR decresce com o aumento do tempo adimensional até alcançar seu valor mínimo. Esse valor é obtido no tempo adimensional $t^* \approx 250$. Esse tempo adimensional é equivalente a um deslocamento de 1250 metros na tubulação. Vale a pena notar que a redução de arraste da solução com 200 ppm de PAM decai de 53% para o mínimo que é 12% como uma consequência da degradação e desagregação polimérica, por ser um polímero flexível, assim como o PEO. O limite assintótico para as concentrações utilizadas são bastantes próximos, apresentando valor de 8% para a concentração de 25 ppm, 10% para 50 ppm e 12% para 100 ppm. Assim como nos resultados para o PEO, o cisalhamento imposto pela bomba é muito evidente, veja a região circulada do gráfico. Apesar de não apresentar uma redução de arraste tão evidente quanto aqueles mostrados na Fig. (4.4), os resultados com PAM indicam que ele é mais resistente à degradação que o PEO. Isso pode ser verificado comparando-se os resultados de redução de arraste dos dois polímeros. Enquanto a solução de 200 ppm de PAM apresenta um limite assintótico de 12%, a solução com PEO apresenta DR de 8%, valor 33% menor. Para as concentrações de 100, 50 e 25 ppm de PAM o mesmo é observado, com valores de 66%, 50% e 50% maiores que aqueles do PEO, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com a literatura, veja [36]. Os autores comparam diferentes tipos de polímeros e mostram que soluções com PAM são mais resistentes que aquelas com PEO. Para ambos os polímeros, a diminuição da eficiência da redução de arraste ocorre devido à degradação ou desagregação polimérica. Os resultados obtidos para as soluções com XG, Fig. (4.6), são consideravelmente diferentes daqueles das soluções de PEO e PAM por se tratar de um polímero rígido. As soluções com XG apresentam uma menor eficiência da redução de arraste, porém apresentam um maior limite assintótico no final do teste. A solução mais concentrada (200 ppm) apresenta uma redução de arraste de 41% e ela decai até 27%, alcançando seu valor mínimo. Para as outras concentrações, a redução de arraste inicial é por volta de 14% para 25 ppm, 21% para 50 ppm e 27% para 100 ppm. Novamente, a DR cai rapidamente até $t^* = 10$ e permanece constante até o fim do teste. Assim como ocorre no tubo, a redução de arraste é uma função crescente da concentração. O mesmo pode ser dito sobre o limite assintótico. A queda de eficiência da redução de arraste foi discutida, também, por Soares *et al.* [58] que acreditam na desagregação das moléculas. Os resultados obtidos para o primeiro espaço anular foram bastantes próximos àqueles encontrados no tubo.

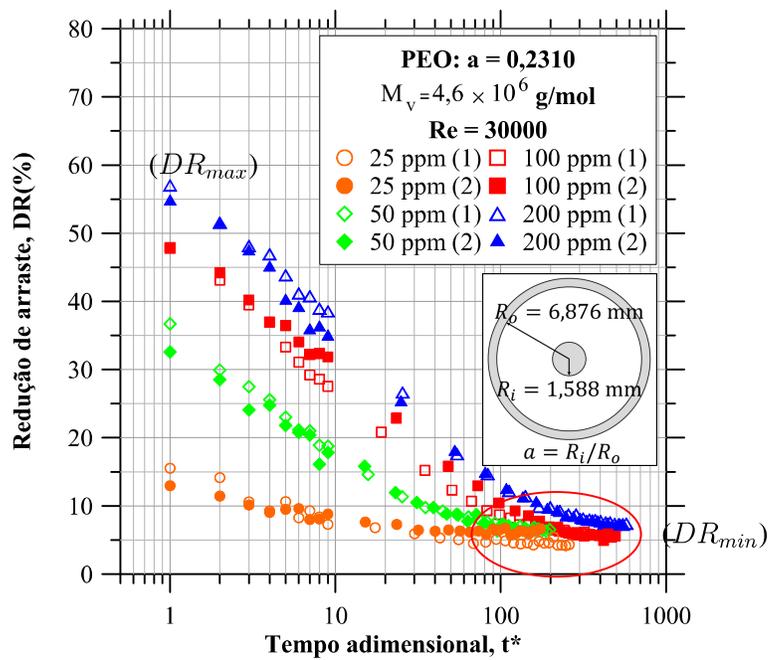


Figura 4.4: Efeito da concentração utilizando soluções com PEO no primeiro espaço anular ($a = 0,2310$).

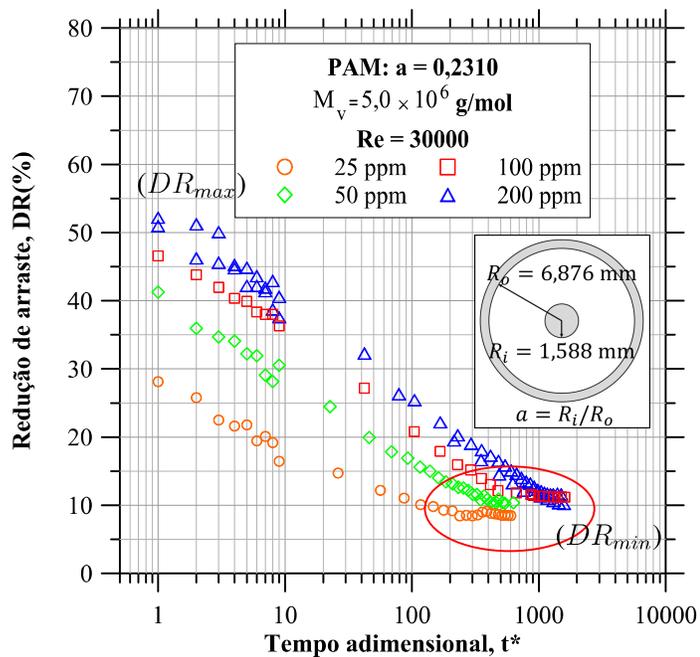


Figura 4.5: Efeito da concentração utilizando soluções com PAM no primeiro espaço anular ($a = 0,2310$).

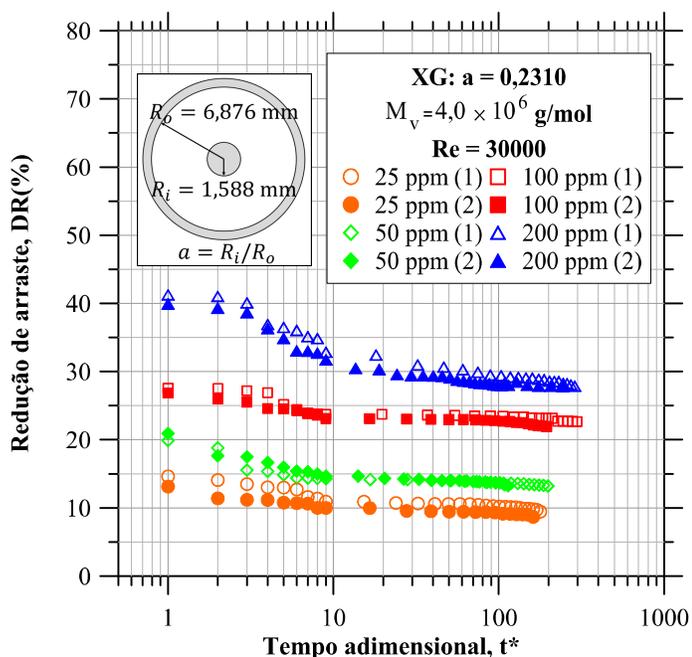


Figura 4.6: Efeito da concentração utilizando soluções com XG no primeiro espaço anular ($a = 0,2310$).

As Tabelas (4.3), (4.4) e (4.5) mostram a taxa de degradação inicial para as soluções com PEO, PAM e XG, respectivamente, concentrações de 25 à 200 ppm. Comparando, primeiramente, os resultados apresentados na Tab. (4.3) com aqueles da Tab. (4.1) é possível observar o aumento da taxa de degradação em relação ao tubo. Além disso, é possível verificar o aumento em relação ao incremento de concentração, fenômeno já explicado anteriormente. Comparando, agora, com a Tab. (4.4) observa-se que as soluções com PAM apresentam, de fato, uma maior resistência. Enquanto a solução com 200 ppm de PAM apresenta uma taxa de degradação de 1,44, a solução com PEO apresenta um valor 78% maior. Para as concentrações de 50 e 100 ppm, os valores da taxa de degradação do PEO são 53% e 81% maiores, respectivamente. A Tab. (4.5) mostra a taxa de degradação para as soluções com XG. Na verdade, o que ocorre é apenas a desagregação das moléculas, o que pode ser verificado com a baixa variação de DR, menos de 1% nos passes iniciais com as concentrações de 25, 50 e 100 ppm e 1,1% para a solução com 200 ppm. Comparando esses resultados com aqueles da Tab. (4.2) é possível verificar também uma maior desagregação devido ao espaço anular. Para a concentração de 200 ppm, o decaimento de DR nos passes iniciais é 1,1% no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$, enquanto no tubo o valor é 0,78%.

Tabela 4.3: Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de degradação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
PEO	25	1,00
	50	2,03
	100	2,51
	200	2,57

Tabela 4.4: Taxa de degradação inicial das soluções com PAM no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de degradação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
PAM	25	1,19
	50	1,32
	100	1,38
	200	1,44

Tabela 4.5: Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de desagregação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
XG	25	0,45
	50	0,64
	100	0,65
	200	1,10

4.1.3 Espaço anular, $a = 0,3505$

Os resultados de DR para as soluções com XG no segundo espaço anular, formado por um tubo com diâmetro interno de $13,7525 \text{ mm}$ e uma barra redonda com diâmetro externo de $4,8200 \text{ mm}$ são mostrados na Fig. (4.7). Novamente, observa-se a mesma tendência dos resultados apresentados nas Figs. (4.2) e (4.6). Isso é, uma redução de arraste mais evidente no início do teste ($t^* = 1$) seguida de um decaimento progressivo até alcançar um valor mínimo no limite assintótico. Além disso, a redução de arraste também aumenta de acordo com a concentração.

A redução de arraste máxima obtida foi com a solução com concentração de 200 ppm , com valor de 44% . Com o incremento do tempo adimensional, o comprimento médio das moléculas cai e, conseqüentemente, seu valor assintótico é atingido. O valor desse limite para essa solução é 26% . Para as concentrações de 25 , 50 e 100 ppm esse valor cai para 10% , 14% e 21% , respectivamente. Nesse estado, a desagregação para e o peso molecular médio alcança o regime permanente com seu menor valor. Comparando esses resultados com os mostrados anteriormente, é possível observar um aumento da eficiência da redução de arraste. As soluções com 200 ppm de XG escoando no tubo e no espaço anular com razão de raios $a = 0,2310$ apresentaram um DR igual a 41% , enquanto que para este espaço anular o resultado é 44% . Para as outras concentrações, os valores continuaram bastantes próximos. Acredita-se que apesar de DR aumentar com o aumento da razão de raios, a desagregação é intensificada pela presença da bomba e não é possível chegar a nenhuma conclusão definitiva.

As taxas de desagregação para as soluções com XG usadas nesse espaço anular são mostradas na Tab. (4.6). Os resultados mostram o aumento da taxa de acordo com o incremento da concentração. Isso também foi observado no tubo e no primeiro espaço anular ($a = 0,2310$). Os valores apresentados aqui apresentam um incremento na taxa de desagregação em relação àqueles mostrados nas Tabs. (4.2) e (4.5), sugerindo, novamente, a influência do espaço anular na degradação. De fato, as três primeiras concentrações apresentaram um incremento de 13% , 18% e 17% , respectivamente.

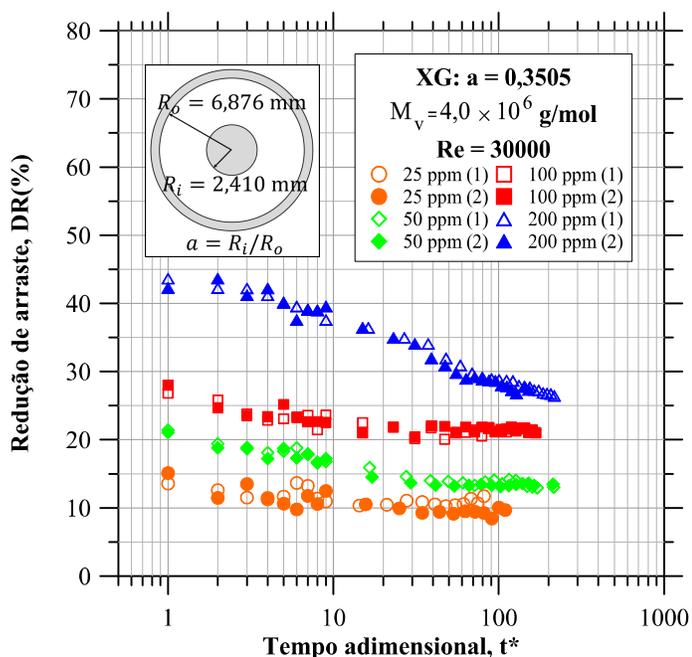


Figura 4.7: Efeito da concentração utilizando a XG no segundo espaço anular ($a = 0,3505$).

Tabela 4.6: Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,3505$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de desagregação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
XG	25	0,51
	50	0,76
	100	0,76
	200	1,10

4.1.4 Espaço anular, $a = 0,5759$

Também foi testado um terceiro espaço anular formado por um tubo com diâmetro interno de $13,7525 \text{ mm}$ e uma barra redonda com diâmetro externo de $7,9200 \text{ mm}$. As Figuras (4.8) e (4.9) mostram os resultados obtidos para as soluções com PEO e XG, respectivamente, nessa geometria. Como nos resultados anteriores, o decaimento de DR diminui, pouco a pouco, até que seu valor assintótico é atingido. Isso ocorre para ambos os polímeros. Para as soluções

com PEO, isso acontece por volta de $t^* = 150$, enquanto para as soluções com XG esse valor é consideravelmente menor, por volta de $t^* = 10$, com concentrações menores.

A Figura (4.8) mostra um DR máximo de 64%, valor superior àqueles encontrados nas Figs. (4.1) e (4.4). De fato, esse valor supera os outros dois em 16% e 21%, respectivamente. Outro fato que vale notar é a redução de arraste máxima para a solução de 25 ppm. Nessa geometria alcançou-se um valor de 45%, enquanto nas outras duas não ultrapassavam 15%. Associa-se esse aumento de 200% em relação ao tubo e o primeiro espaço anular ao aumento da eficiência da redução de arraste com o incremento da razão de raios. Como a solução apresenta uma concentração baixa de polímero, acredita-se que o efeito de aumento da redução de arraste seja muito maior do que a degradação proporcionada pela bomba.

Para as soluções com XG é possível observar uma redução de arraste máxima de 46%, valor 4,5% maior que aquele da geometria $a = 0,3505$ e 12% maior que o DR máximo do tubo e do primeiro espaço anular ($a = 0,2310$). A redução de arraste cai até atingir o valor de 33%. Esse valor cai para 16% para a concentração de 25 ppm, 20% para 50 e, finalmente, 24% para 100 ppm. Comparando esses valores com os obtidos na geometria com razão de raios $a = 0,3505$ observamos um aumento de 30, 42, 14 e 27% do limite assintótico com as concentrações de 25 à 200 ppm, respectivamente. Com esses resultados fica evidente que o incremento da razão de raios (a) torna a redução de arraste mais evidente. Por ser um fenômeno de parede, acredita-se que o espaço anular apresente um DR mais evidente à medida que $a \rightarrow 1$. Entretanto, por apresentar uma maior superfície em contato com o fluido, isso causa maior degradação polimérica. Isso será discutido mais adiante.

De fato, a redução de arraste é mais evidente à medida que $a \rightarrow 1$. Os resultados utilizando as soluções com XG mostram um DR máximo maior do que aquelas das Figs. (4.2), (4.6) e (4.7) para todas as concentrações. Por não apresentar degradação, como já comentado anteriormente e discutido por Pereira *et al.* [36] e Soares *et al.* [58], essa análise se torna mais fácil. As soluções com PEO apresentam uma alta taxa de degradação, devido a isso, apenas em duas concentrações o aumento de DR máximo foi observado.

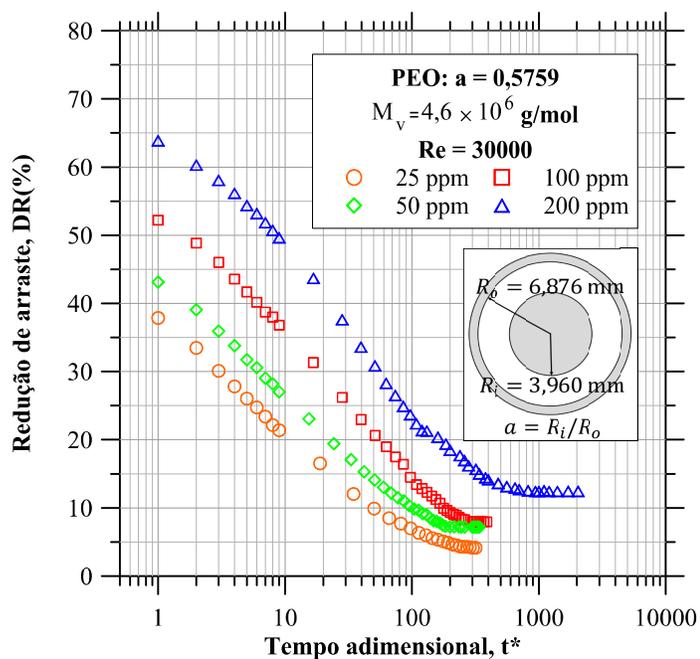


Figura 4.8: Efeito da concentração utilizando o PEO no terceiro espaço anular ($a = 0,5759$).

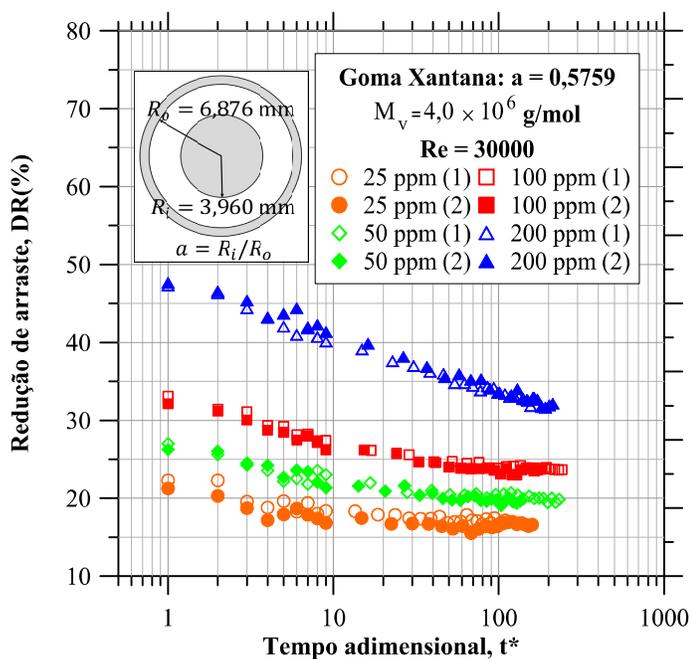


Figura 4.9: Efeito da concentração utilizando a XG no terceiro espaço anular ($a = 0,5759$).

Como esperado, a taxa de degradação inicial para as soluções com PEO no espaço anular $a =$

0,5759, Tab. (4.7), são maiores quando comparadas àquelas do tubo e do espaço anular $a = 0,2310$. O valor encontrado aqui representa um aumento de 17% para a concentração de 25 ppm, 17% para 50, 26% para 100 e 41% para 200 ppm, comparados ao tubo. Para as soluções com XG, Tab. (4.8), também ocorre o aumento. Da solução menos para a mais concentrada, o aumento da taxa de desagregação inicial foi de 55, 24, 25 e 66%, respectivamente. É possível verificar também o efeito de diferentes tipos de polímeros com esses resultados. Para todas as geometrias testadas, as soluções com PEO sempre apresentaram maior taxa de degradação inicial. Esse resultado está coerente e de acordo com a literatura (veja [36, 58]).

Tabela 4.7: Taxa de degradação inicial das soluções com PEO no espaço anular com razão de raios $a = 0,5759$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de degradação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
PEO	25	1,93
	50	2,26
	100	2,63
	200	2,91

Tabela 4.8: Taxa de desagregação inicial das soluções com XG no espaço anular com razão de raios $a = 0,5759$.

Polímero	Concentração (ppm)	Taxa de desagregação $-\left(\frac{dDR(\%)}{dt^*}\right)$
XG	25	0,59
	50	0,86
	100	0,95
	200	1,30

4.2 Efeito da geometria na redução de arraste

Os resultados estão apresentados em termos da redução de arraste (DR) e do tempo adimensional (t^*) e foram separados em duas subseções, a primeira para a goma xantana e a segunda para o

óxido de polietileno. Os resultados apresentados a seguir foram criados a partir da comparação das Figs. (4.1), (4.2), (4.4), (4.6), (4.7), (4.8) e (4.9). Os testes foram realizados com um número de Reynolds fixo em 30.000 e com a temperatura de 24 °C.

4.2.1 Goma xantana, $\overline{M}_v = 4,0 \times 10^6 \text{ g/mol}$

Utilizando os resultados apresentados nas Figs. (4.2), (4.6), (4.7) e (4.9) é possível ver o efeito da geometria com uma comparação para cada concentração. As Figuras (4.10a), (b), (c) e (d) mostram o efeito da geometria para as soluções com concentração de 25, 50, 100 e 200 ppm de XG, respectivamente.

Por ser um fenômeno de parede (veja[73, 74]), espera-se que a redução de arraste se torne mais evidente com o aumento da razão de raios aumente, uma vez que aumenta-se a superfície em contato com o fluido. Analisando os resultados para as concentrações de 25 ppm, Fig. (4.10a), o DR máximo com a geometria de $a = 0,5759$ apresentou um valor de 23%. Esse valor é 28% maior que aqueles das outras geometrias. Com o aumento da concentração, o espaço anular com $a = 0,5759$ ainda apresenta os maiores valores. DR máximo é 24, 22 e 14% maiores em relação às outras.

Em relação ao limite assintótico, observa-se um aumento de 100% para $a = 0,5759$ quando comparado ao tubo para as soluções com 25 ppm de XG. Para as concentrações de 50, 100 e 200 ppm esses valores caem para 66, 20 e 22%. Essa diferença se torna menor devido a maior interação do polímero com a bomba helicoidal, que aumenta a taxa de desagregação com o incremento da concentração.

Reforçando o que foi comentado anteriormente, esses resultados mostram que DR é função crescente da razão de raios, assim como é para a concentração e peso molecular. Além disso, fica evidente que quando $a \rightarrow 0$, o espaço anular apresenta a mesma tendência do tubo. O que faz sentido, uma vez que $a \rightarrow 0$ quando o diâmetro da barra tende a zero ($D_i \rightarrow 0$).

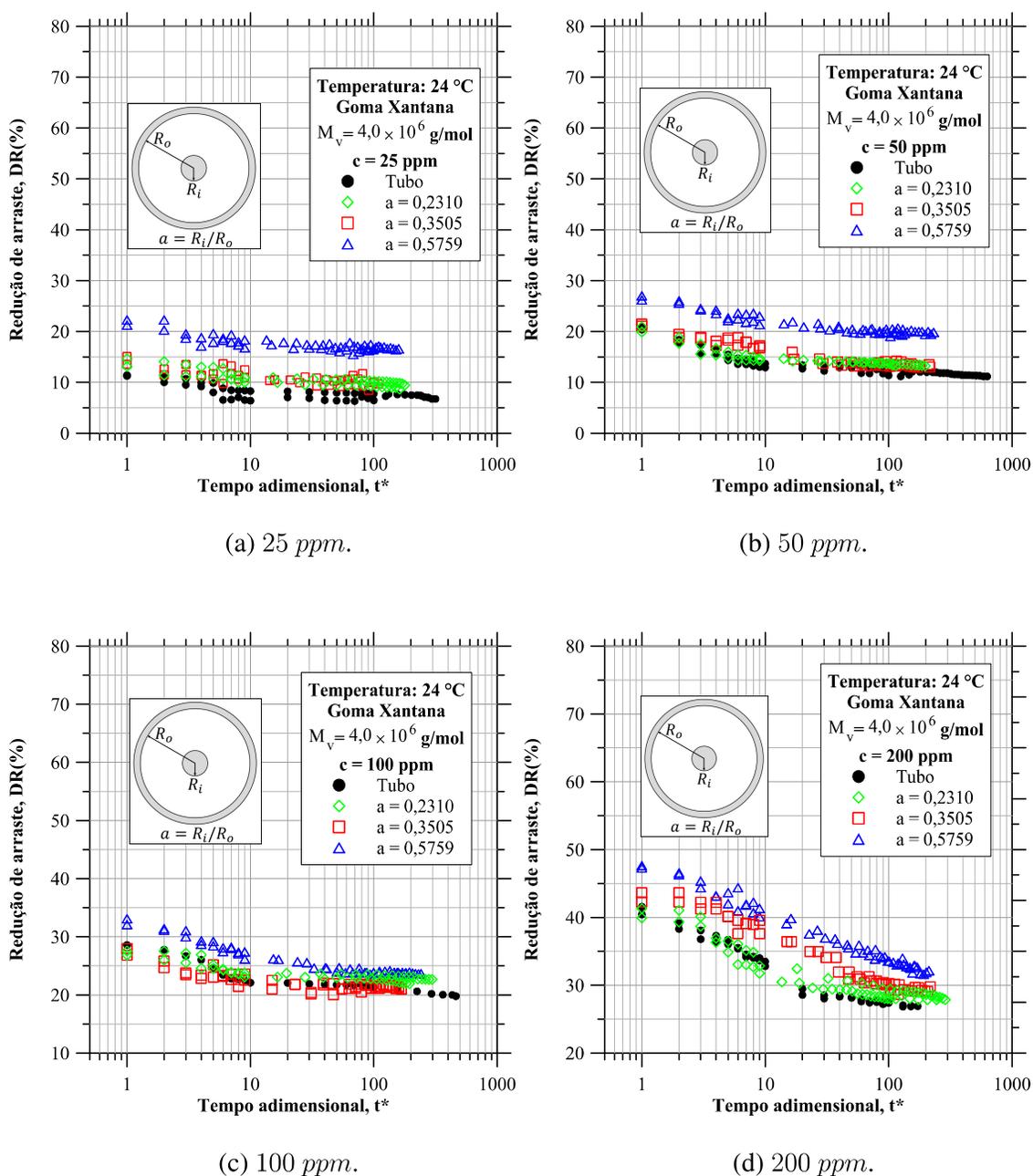


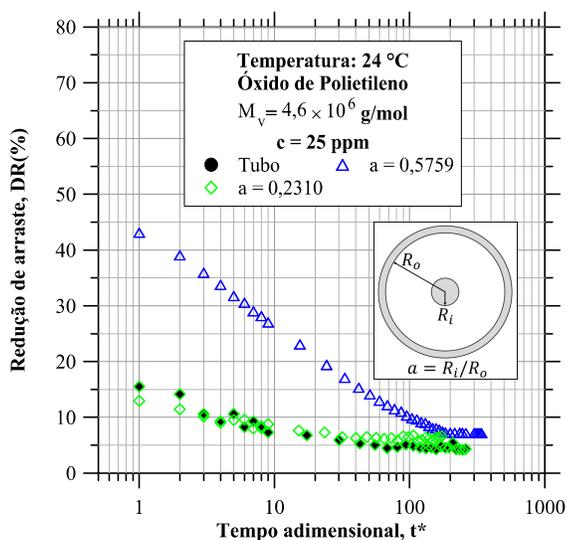
Figura 4.10: Efeito da geometria na DR com as soluções com XG.

4.2.2 Óxido de polietileno, $M_v = 4,6 \times 10^6$ g/mol

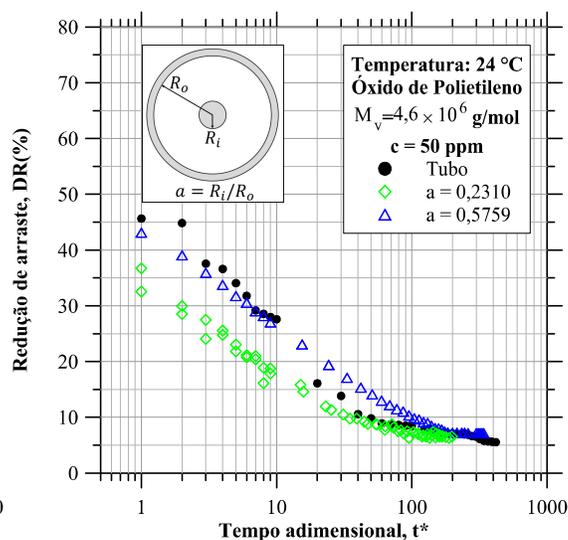
A Figura (4.11) mostra a comparação para os resultados utilizando PEO com concentração de 25 à 200 ppm. Como acontece nos resultados apresentados para a XG, a maior razão de raios

($a = 0,5759$) apresenta DR máximo mais evidente para as concentrações de 25 e 200 ppm. O mesmo não pode ser visto com as concentrações de 50 e 100 ppm. Nesses resultados é possível verificar que a taxa de degradação para as soluções com 200 ppm são maiores quando $a \rightarrow 1$. Enquanto para a concentração de 25 ppm e geometria $a = 0,5759$ é possível observar um aumento de 175% em relação ao tubo, nos resultados das outras concentrações os valores encontrados são mais próximos e apenas na concentração de 200 ppm DR máximo apresenta um valor mais significativo, 18% maior. Por ser um polímero flexível e poder se degradar, os limites assintóticos apresentaram uma diferença de 40%. Esse valor aparenta ser significativo, porém, por se tratar de uma região em que a eficiência é baixa, estamos falando de uma diferença de 1 a 2% no valor de DR.

Acredita-se que apesar do aumento da razão de raios aumentar a redução de arraste, aumenta-se também a degradação. Assim, por se tratar de um polímero flexível, o PEO apresente uma taxa de degradação maior para essas concentrações, quando comparada ao aumento da eficiência da redução de arraste. Ou seja, além da degradação imposta pela bomba, a mudança de geometria também favorecerá a degradação das moléculas de PEO. Isso pode ser verificado na região circulada da Fig. (4.11d).



(a) 25 ppm.



(b) 50 ppm.

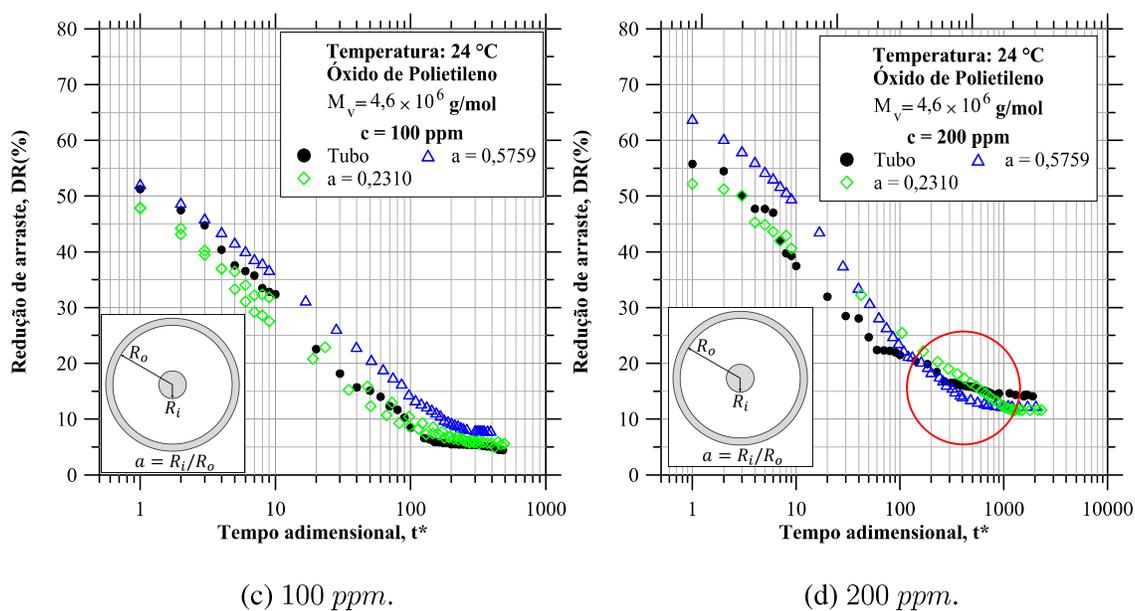


Figura 4.11: Efeito da geometria no DR com as soluções com PEO.

Utilizando a análise de incertezas feita no capítulo 3 podemos explicar, também, os resultados obtidos na comparação das soluções com PEO. Por apresentarem uma diferença pequena, poderíamos considerar que para as condições testadas, os polímeros flexíveis apresentaram a mesma eficiência e taxa de degradação em todos os espaços anulares e no tubo, com exceção para a concentração de 25 ppm, que apresentou uma alta eficiência no espaço anular $a = 0,5759$.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho é uma abordagem experimental para a comparação do fenômeno de redução de arraste em escoamentos turbulentos em tubos e espaços anulares. Os testes foram realizados utilizando soluções aquosas de óxido de polietileno (PEO), poliacrilamida (PAM) e goma xantana (XG). Usam-se concentrações de 25, 50, 100 e 200 *ppm* no tubo e nos espaços anulares com razão de raios de 0,2310, 0,3505 e 0,5759 para cada polímero, além de comparar os espaços anulares em função da redução de arraste (*DR*) pelo tempo adimensional (t^*), parâmetro esse que conta quantas vezes o volume inicial de solução passa pelo o circuito experimental. Os testes foram conduzidos fixando-se o número de Reynolds e temperatura. Nesses estudos também foram levados em conta previamente o tempo de diluição da amostra e condição de estoque, assim como o método de mistura dos polímeros. Os resultados são divididos em duas partes, uma que mostra a influência da concentração dos aditivos com diferentes tipos de polímeros e outra que mostra a influência da geometria na redução de arraste.

Comparando-se os resultados das soluções com óxido de polietileno, poliacrilamida e goma xantana, nota-se que as soluções de PEO e PAM apresentam um DR mais evidente no início, entretanto, a degradação faz com que a eficiência caia consideravelmente até alcançar um limite assintótico. Isso também acontece nas soluções com XG, porém a diferença entre esse limite assintótico e o DR máximo é muito menor do que aqueles das soluções com PEO e PAM. Nesses resultados o DR é mostrado em função do tempo adimensional definido no capítulo 2. Os resultados comprovam também que para as soluções com XG apenas a desagregação ocorre, como discutido por alguns autores. É interessante notar, ainda, que as soluções com PAM são

significativamente mais resistentes que as soluções com PEO, embora apresentem uma redução de arraste menos evidente em maiores concentrações. Os resultados com as diferentes geometrias mostram que com o aumento da razão de raios, a taxa de degradação (para os polímeros flexíveis) e a taxa de desagregação (para o polímero rígido) aumenta, porém, isso também torna a redução de arraste mais evidente. Para avaliar a taxa de degradação ou desagregação, são levados em conta os primeiros passes da solução na bancada. Os resultados indicam que a taxa aumenta de acordo com que $a \rightarrow 1$.

Além dos pontos já comentados, é possível observar também a influência de uma bomba de deslocamento positivo do tipo helicoidal. Comparando os resultados obtidos com aqueles da literatura, observa-se que o limite assintótico de DR alcançado utilizando a bomba é menor em relação àqueles que deslocam o fluido no interior da tubulação através de um pistão pneumático. Na literatura mostra-se que com o aumento da concentração a solução se torna mais resistente à degradação. Para os polímeros flexíveis utilizados (óxido de polietileno e poliácridamida) isso não foi observado. A explicação para o fenômeno observado leva em conta a probabilidade de interação da bomba com os polímeros. A medida em que ocorre o incremento de concentração, a degradação na bomba aumenta e, devido à isso, os limites assintóticos para as soluções de polímeros flexíveis com as concentrações de 25 à 200 *ppm* apresentaram valores tão próximos.

Por fim, chega-se à conclusão que a redução de arraste é mais evidente nos espaços anulares com maiores razões de raios ($a \rightarrow 1$), porém, neste trabalho, estes resultados foram alcançados apenas utilizando as soluções com XG, uma vez que os resultados com PEO não apresentaram grandes diferenças. Isso acontece devido à alta taxa de degradação proporcionada pela bomba helicoidal. Mais uma vez, isso sugere que as soluções com XG apresentem apenas a desagregação das moléculas. Vale notar, também, que quanto menor a razão de raios, mais semelhante ao tubo se torna o espaço anular. De fato isso faz sentido, uma vez que o diâmetro da barra tende a zero quando $a \rightarrow 0$. Os resultados das Figs. (4.10) e (4.11) mostram isso.

Como trabalho futuro sugere-se o estudo dos espaços anulares utilizando um pistão pneumático para promover o escoamento, o que eliminaria complemente a atuação da bomba na taxa de degradação ou desagregação dos polímeros. De fato, será possível observar como a redução de arraste é influenciada apenas pela geometria.

Referências Bibliográficas

- [1] F. C. Li, B. Yu, J. J. Wei, and Y. Kawaguchi, *Turbulent Drag Reduction by Surfactant Additives*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
- [2] Y. Wang, B. Yu, J. L. Zakin, and H. Shi, “Review on drag reduction and its heat transfer by additives,” *Advances in Mechanical Engineering*, 2011.
- [3] B. A. Toms, “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.
- [4] J. G. Savins, “Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow,” *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 4, p. 203, 1964.
- [5] A. Gyr and H. W. Bewersdorff, *Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives*. Springer Science Business Media, B. V., 1995.
- [6] A. B. Metzner and M. G. Park, “Turbulent flow characteristics of visco-elastic fluids,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 20, p. 291, 1964.
- [7] H. C. Hershey and J. L. Zakin, “A study of turbulent drag reduction of solution of high polymers in organic solvents,” *AIChE*, p. 291, 1965.
- [8] A. F. Horn and E. W. Merrill, “Midpoint scission of macromolecules in dilute solution in turbulent flow,” *Nature*, vol. 312, pp. 140–141, 1984.
- [9] A. S. Pereira and E. J. Soares, “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.

- [10] E. D. Burger and L. G. Chorn, “Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing prudhoe bay crude oil,” *J. Rheology*, vol. 24, p. 603, 1980.
- [11] G. Fabula, “Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction,” *Trans ASME J Basic Engng*, pp. 93–453, 1971.
- [12] R. C. R. Figueredo and E. Sabadini, “Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide,” *Colloids and Surfaces A*, vol. 215, no. 1-3, pp. 77–86, 2003.
- [13] F. E. Bailey and J. V. Koleske, *Poly(ethylene oxide)*. Academic Press Inc., 1976.
- [14] R. Barati and J.-T. Liang, “A review of fracturing fluid systems used for hydraulic fracturing of oil and gas wells,” *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1–11, 2014.
- [15] R. P. Singh, J. Singh, S. R. Deshmukh, and A. Kumar, “The effect of grafted and ungrafted guar gum on turbulent flow of water and on hydraulic conductivity of soil,” in *Proceedings of the IUTAM Symposium on the Influence of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields*, p. 131–139, 1985.
- [16] J. Golda, “Hydraulic transport of coal in pipes with drag reducing additives,” *Chem Engng Commun*, vol. 45, pp. 53–67, 1986.
- [17] H. L. Greene, R. F. Nokes, and L. C. Thomas, “Drag reduction in pulsed flow of blood,” *Medical Research Engineering*, pp. 20–21, 1970.
- [18] H. L. Greene and S. R. Madan, “The role of fluid viscoelasticity during in vitro destruction of erythrocytes,” *Biorheology*, vol. 6, pp. 377–382, 1975.
- [19] H. L. Greene, R. F. Mostardi, and R. F. Nokes, “Effects of drag reducing polymers on initiation of atherosclerosis,” *Polymer Engineering and Science*, vol. 20, no. 7, pp. 499–504, 1980.
- [20] R. R. Rothfus, C. C. Monrad, and V. E. Senecal, “Velocity distribution and fluid friction

in smooth concentric annuli," *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 42, 1950.

- [21] J. R. Walker and R. R. Rothfus, "Transitional velocity patterns in smooth concentric annulus," *AIChE Journal*, vol. 5, pp. 51–59, 1959.
- [22] D. M. Meter and R. B. Bird, "Turbulent newtonian flow in annuli," *AIChE Journal*, vol. 7, pp. 41–45, 1961.
- [23] E. O. Macagno and D. W. McDougall, "Turbulent flow in annular pipes," *AIChE Journal*, vol. 12, pp. 437–444, 1966.
- [24] O. C. Jones Jr and J. C. M. Leung, "An improvement in the calculation of turbulent flow friction in smooth concentric annuli," *ASME, Journal of Fluids Engineering*, vol. 103, pp. 615–623, 1981.
- [25] H. Rubin and C. Elata, "Turbulent flow of dilute polymer solutions through an annulus," *AIChE Journal*, vol. 17, pp. 990–996, 1971.
- [26] L. Hoffmann, P. Schümmer, and H. Schwerdt, "Strömung viskoelastischer flüssigkeiten im ringspalt," *Rheologica Acta*, vol. 14, no. 7, pp. 626–630, 1975.
- [27] J. L. Zakin, B. Lu, and H.-W. Bewersdorff, "Surfactant drag reduction," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 14, 1998.
- [28] C. A. Kim, J. T. Kim, K. Lee, H. J. Choi, and M. S. Jhon, "Mechanical degradation of dilute polymer solutions under turbulent flow," *Polymer*, vol. 41, pp. 7611–7615, 2000.
- [29] P. S. Virk, E. W. Merrill, H. S. Mickley, and K. A. Smith, "The toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 30, pp. 305–328, 1967.
- [30] P. S. Virk, H. S. Mickley, and K. A. Smith, "The ultimate asymptote and mean flow structure in Toms' phenomenon," *ASME-Journal of Applied Mechanics*, vol. 37, pp. 488–493, 1970.
- [31] P. S. Virk, "Drag reduction fundamentals," *AIChE Journal*, vol. 21, pp. 625–650, 1975.
- [32] J. L. Zakin and D. L. Hunston, "Effects of solvent nature on the mechanical degradation

- of high polymer solutions,” *J Appl Polym Sci*, vol. 22, pp. 1763—1766, 1978.
- [33] T. Moussa and C. Tiu, “Factors affecting polymer degradation in turbulent pipe flow,” *Chemical Engineering Science*, vol. 49, pp. 1681–1692, 1994.
- [34] J. I. Sohn, C. A. Kim, H. J. Choi, and M. S. Jhon, “Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 45, pp. 61–68, 2001.
- [35] S. A. Vanapalli, T. M. Islam, and J. M. Solomon, “Universal scaling for polymer chain scission in turbulence,” *Physics of Fluids*, vol. 17, 2005.
- [36] A. S. Pereira, R. M. Andrade, and E. J. Soares, “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.
- [37] R. M. Andrade, A. S. Pereira, and E. J. Soares, “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.
- [38] W. Brostow, H. Ertepinar, and R. P. Singh, “Flow of dilute polymer solutions: Chain conformations and degradation of drag reducers,” *Macromolecules*, vol. 23, pp. 5109–5118, 1990.
- [39] J. M. J. Den Toonder, M. A. Hulsen, G. D. C. Kuiken, and F. T. M. F Nieuwstadt, “Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 337, pp. 193–231, 1997.
- [40] M. Rubinstein and R. H. Colby, *Polymer Physics*. Oxford University Press, 2003.
- [41] D. I. Bower, *An Introduction to Polymer Physics*. Cambridge University Press, 2002.
- [42] H. C. Hershey and J. L. Zakin, “A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in turbulent flow of dilute polymer solutions,” *Chemical Engineering Science*, vol. 22, pp. 1847–1857, 1967.
- [43] J. L. Lumley, “Drag reduction by additives,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 1,

pp. 367–384, 1969.

- [44] F. H. Bark, E. J. Hinch, and M. T. Landahl, “Drag reduction in turbulent flow due to additives: a report on euromech 52,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 68, pp. 129–138, 1975.
- [45] J. L. Lumley, “Drag reduction in turbulent flow by polymer additives,” *Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews*, vol. 7, pp. 263–290, 1973.
- [46] E. J. Hinch, “Mechanical models of dilute polymer solutions in strong flows,” *Physics of Fluids*, vol. 20, pp. 22–30, 1977.
- [47] G. Ryskin, “Turbulent drag reduction by polymers: a quantitative theory,” *Physical Review Letters*, vol. 59, pp. 2059–2062, 1987.
- [48] P. Orlandi, “A tentative approach to the direct simulation of drag reduction by polymers,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 60, pp. 277–301, 1995.
- [49] V. S. L’vov, A. Pomyalov, I. Procaccia, and V. Tiberkevich, “Drag reduction by polymer in wall bounded turbulence,” *Physical Review Letters*, vol. 92, 2004.
- [50] M. Tabor and P. G. De Gennes, “A cascade theory of drag reduction,” *Europhysics Letter*, vol. 7, pp. 519–522, 1986.
- [51] D. D. Joseph, *Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids*. Springer-Verlag, 1990.
- [52] K. R. Sreenivasan and C. M. White, “The onset of drag reduction by dilute polymer additives and the maximum drag reduction asymptote,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 409, pp. 149–164, 2000.
- [53] T. Min, J. Y. Yoo, H. Choi, and D. D. Joseph, “Drag reduction by polymer additives in aturbulent channel flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 286, pp. 213–238, 2003.
- [54] B. H. Zimm, “Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss,” *Journal of Chemical Physics*, vol. 24, pp. 269–278, 1956.
- [55] Y. Dubief, C. M. White, V. E. Terrapon, E. S. G. Shaqfeh, P. Moin, and K. Lele, “On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows,”

Journal of Fluid Mechanics, vol. 514, pp. 271–280, 2004.

- [56] J. M. Solomon, S. A. Vanapalli, and T. M. Islam, “Scission-induced bounds on maximum polymer drag reduction in turbulent flow,” *Physics of Fluids*, vol. 17, 2005.
- [57] L. A. S. Silva, “Redução de arraste e degradação de polímeros flexíveis em escoamentos turbulentos em dutos,” Master’s thesis, Universidade Federal do Espírito, Espírito Santo, Brazil, 2014.
- [58] E. J. Soares, G. A. B. Sandoval, L. A. S. Silva, A. S. Pereira, R. Trevelin, and F. Thomaz, “Loss of efficiency of polymeric drag reducers induced by high reynolds number flows in tubes with imposed pressure,” *Physics of Fluids*, vol. 27, p. 125105, 2015.
- [59] G. A. B. Sandoval, “Perda de eficiência em redução de atrito em escoamentos com altos números de reynolds em tubos com pressão de entrada fixa,” Master’s thesis, Universidade Federal do Espírito, Espírito Santo, Brazil, 2015.
- [60] O. C. Jones Jr, “An improvement in the calculation of turbulent friction in rectangular ducts,” *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 98, pp. 173–181, 1976.
- [61] J. G. Knudsen and D. L. Katz, *Fluid Dynamics and Heat Transfer*. McGraw-Hill, 1958.
- [62] R. L. Thompson and E. J. Soares, “Viscoplastic dimensionless numbers,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 238, pp. 57–64, 2016.
- [63] R. W. Fox, P. J. Pritchard, and A. T. McDonald, *Introdução à mecânica dos fluidos*. LTC, 8a ed., 2014.
- [64] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Mecânica dos fluido: Fundamentos e aplicações*. AMGH, 3a ed., 2015.
- [65] F. M. White, *Mecânica dos fluido*. AMGH, 6a ed., 2011.
- [66] *Efeito da redução de arraste por adição de polímeros comerciais: Efeito da concentração e diâmetro do tubo*, (Foz do Iguaçu, Brasil), ENAHPE, 2011.
- [67] H. J. Choi, C. A. Kim, J. Sohn, and M. S. Jhon, “An exponential decay function for polymer degradation in turbulent drag reduction,” *Polymer Degradation and Stability*, vol. 69,

pp. 341–346, 2000.

- [68] N. Lucas, C. Bienaime, C. Belloy, M. Queneudec, F. Silvestre, and J.-E. Nava-Saudeco, “Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques - a review,” *Chemosphere*, vol. 73, pp. 429–442, 2008.
- [69] V. C. Bizotto and E. Sabadini, “Poly(ethylene oxide) x polyacrylamide. which one is more efficient to promote drag reduction in aqueous solution and less degradable,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 25, pp. 1844–1850, 2008.
- [70] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The study of uncertainties in physical measurements*. University Science Books, 2nd ed., 1997.
- [71] BIMP, *Evaluation of measurement data - Guide to expression of uncertainty in measurement*. JCGM, 1st ed., 2008.
- [72] H. W. Coleman and W. G. Steele, *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. University Science Books, 3rd ed., 2009.
- [73] C. M. White and M. G. Mungal, “Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives,” *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 40, pp. 253–256, 2008.
- [74] A. S. Pereira, G. Mompean, L. Thais, and E. J. Soares, “Transient aspects of drag reducing plane couette flows,” *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 241, pp. 60–69, 2017.