

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Ian de Souza Cosenza**

**Estudo sobre a degradação de polímeros  
redutores de atrito em escoamentos turbulentos**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio prestado durante estes anos de minha graduação na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Fico muito grato por todos seus esforços de me proporcionar estudar engenharia em uma faculdade que é referência mundial.

Também gostaria de agradecer a todo o corpo docente da Universidade, bem como os funcionários, que trabalham arduamente para manter a excelência desta faculdade. Além de um agradecimento direcionado a todos que trabalham no Laboratório de Engenharia de Fluidos, que proporcionaram um ótimo ambiente de trabalho e pesquisa.

Um agradecimento especial ao meu orientador neste trabalho, Igor Braga de Paula, por toda a paciência e calma, durante os meses em que estivemos trabalhando juntos, além de todo o conhecimento passado, sempre com muita dedicação e empenho. Fica aqui o meu muito obrigado!

Agradeço também a todos os meus colegas e grandes amigos que pude fazer durante esta jornada. Obrigado por tornarem o árduo caminho, mais leve e divertido.

Por fim, gostaria de dedicar este trabalho, que fecha um ciclo importante em minha vida, e me torna engenheiro, à minha querida avó, que sempre desejou ver minha formatura. Sei que está muito orgulhosa em algum lugar!

## **RESUMO**

### **Estudo sobre a degradação de polímeros redutores de atrito em escoamentos turbulentos**

A redução de atrito é um tema de profundo interesse da indústria e demais setores de tecnologia, pois é responsável pela redução de gastos energéticos em diversos processos. O fenômeno da redução de atrito por adição de polímeros foi descoberto por Toms em 1948 e desde então vem sendo estudado por diversos pesquisadores para conseguir entendê-lo melhor. Apesar disso, ainda hoje, não se tem um consenso acerca dos mecanismos físicos que governam o problema. Este trabalho visa estudar a redução de arrasto do escoamento turbulento causada pela adição de polímeros em diferentes concentrações. Além disso, buscou-se avaliar a degradação desses polímeros com o tempo de residência na tubulação. Sabe-se que os polímeros se degradam devido ao cisalhamento, e que esta degradação é mais acentuada ao passar por bombas ou válvulas, por exemplo. Por isso, utilizou-se uma bancada de testes do tipo roda. Esse dispositivo consiste em uma tubulação montada sobre uma roda, formando um circuito fechado. O dispositivo é orientado na direção vertical, a tubulação é, parcialmente, preenchida com fluido e girada em torno do seu eixo. Assim, as paredes da tubulação se movem e o fluido se concentra na parte inferior da roda. Dependendo da velocidade de giro o escoamento se torna turbulento. Com isso, obtém-se um escoamento turbulento sem que esse passe por bombas, e assim é possível avaliar a degradação dos polímeros apenas devido à turbulência do escoamento. Sabe-se que a viscosidade extensional e o tempo de relaxação da solução polimérica são afetados quando os polímeros sofrem degradação. Logo, essas propriedades foram medidas nesse trabalho para fluidos com diferentes tempos de residência na tubulação. O trabalho mostra que, de fato, a turbulência do escoamento induz uma redução abrupta no tempo de relaxação da solução e que essa redução pode ser diretamente relacionada com a queda de performance dos redutores de atrito. Devido as baixas concentrações das soluções analisadas e consequente viscosidade extensional, encontrou-se dificuldades para caracterizar a degradação de mistura para elevados tempos de residência. Ainda assim, a metodologia utilizada parece ser promissora para estudos mais detalhados acerca da degradação de polímeros diluídos em alta concentração.

Palavras chaves: Redução de arrasto. Polímeros. Escoamento turbulento. Reômetro.

## **ABSTRACT**

### **Study on the degradation of drag reducing polymers in turbulent flows**

Drag reduction strategies are subject of deep interest for industry and other sectors of technology, since they can reduce energy expenses in several processes. The phenomenon of drag reduction by addition of polymers was discovered by Toms in 1948 and has been studied by several researchers. Despite this, there is still no consensus about the physical mechanisms that govern the problem. This work aims at studying drag reduction on turbulent pipe flows caused by the addition of polymers in different concentrations. In addition, it was observed the degradation of polymeric solutions with the residence time in the pipeline. It is known that the polymers can degrade due to shear, and this degradation is more pronounced when subjected to high shear stresses such as in pumps or valves. Therefore, a wheel-type test bench was used. This device consists of a pipe mounted on a wheel, forming a closed circuit. The device is oriented in the vertical direction. The pipe is partially filled with fluid and rotated over its axis. Thus, the walls of the tubing move and the fluid is concentrated in the lower part of the wheel. Depending on the speed of rotation the flow becomes turbulent. Thereby, a turbulent flow is obtained without it passing through pumps, and thus it is possible to evaluate the degradation of the polymers only due to the flow turbulence. It is known that the extensional viscosity and the relaxation time of the polymer solution are affected when the polymers undergo degradation. Therefore, these properties were measured in this work for fluids with different residence times in the pipe. The work shows that, in fact, the flow turbulence induces an abrupt reduction in the relaxation time of the solution and that this reduction can be directly related to the performance of the friction reducers. Due to the low concentrations of the solutions analyzed and consequent extensional viscosity, difficulties were encountered in characterizing the degradation of the mixture for high residence times in the tube. Nevertheless, the methodology used seems to be promising for more detailed studies on the degradation of high concentration diluted polymers.

Keywords: Drag reduction. Polymers. Turbulent flow. Rheometer.

## Sumário

1 Introdução	9
2 Revisão da Literatura	11
3 Metodologia	19
3.1. Aparato Experimental	19
3.2. Procedimento Experimental	20
3.3. Caracterização dos fluidos de trabalho	26
3.4. Densidade	26
3.5. Viscosidade dinâmica	26
3.6. Viscosidade extensional e tempo de relaxação	26
4 Cálculos	28
4.1. Coeficiente de atrito	28
4.2. Eficiência do motor elétrico	31
4.3. Assíntota de Virk (curva de máxima redução de atrito)	33
5 Resultados	36
5.1. Redução de Arrasto	36
5.2. Resultados experimentais em comparação com a assíntota de Virk	38
5.3. Tempos de relaxação	40
6 Conclusão	42
7 Referências Bibliográficas	43

## Lista de figuras

Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes .....	13
Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda .....	15
Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito .....	16
Figura 4: Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede .....	17
Figura 5: Redução de arrasto em função do tempo .....	18
Figura 6: Aparato Experimental tipo roda .....	20
Figura 7: Viscosímetro extensional .....	27
Figura 8: Esquema do aparato experimental .....	29

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico .....	21
Tabela 2: Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico e da água .....	23
Tabela 3: Torque devido apenas ao fluido na tubulação .....	25
Tabela 4: Cálculo dos coeficientes de atrito teóricos e experimental .....	30
Tabela 5: Cálculo dos rendimentos associados .....	32

## Lista de gráficos

Gráfico 1: Repetibilidade dos testes de ar Torque vs Velocidade .....	22
Gráfico 2: Repetibilidade dos testes de água Torque vs Velocidade .....	24
Gráfico 3: Torque devido apenas ao fluido.....	25
Gráfico 4: Comparação dos coeficientes de atrito .....	30
Gráfico 5: Rendimento do motor elétrico .....	32
Gráfico 6: Diferença no torque da água .....	33
Gráfico 7: Assíntota de Virk.....	34
Gráfico 8: Redução de arrasto no tempo – 80 ppm.....	36
Gráfico 9: Redução de arrasto no tempo – 40 ppm.....	37
Gráfico 10: Redução de arrasto no tempo - 80 ppm vs. 40 ppm.....	38
Gráfico 11: Assíntota de Virk.....	39
Gráfico 12: Tempos de relaxação vs. Tempos das amostras.....	40



# 1 Introdução

O fenômeno da redução de atrito pela adição de polímeros vem sendo estudado há décadas por vários grupos de pesquisa ao redor do mundo. Como destacado no trabalho de White e Mungal (2008), as interações dinâmicas entre polímeros e escoamentos turbulentos ainda geram muitas dúvidas entre os pesquisadores. Tal fato desperta a curiosidade e interesse de muitos, principalmente da indústria em geral, por se tratar da diminuição do atrito em escoamentos.

A importância da redução de atrito por polímeros é que, reduzindo-se o atrito ao longo de uma tubulação, diminui-se também a perda de energia total do sistema e com isso, reduzem-se os gastos com o bombeamento do fluido, redução de desgaste de componentes mecânicos e consequente aumento da vida útil dos mesmos, redução de vibração nas linhas, aumento de integridade e confiabilidade de componentes, entre outros. Assim, os benefícios do uso de redutores de atrito são muitos e por isso despertam o interesse de várias indústrias pelo mundo. Com um maior entendimento e domínio dos efeitos associados com a redução de arrasto por polímeros, seria possível a criação de técnicas para otimizar sua utilização no transporte de fluidos, como por exemplo, em equipamentos de bombeiros para aumentar a vazão do escoamento, em sistemas de irrigação e drenagem (Sellin & Ollis, 1980; Khalil *et al.*, 2002), além de aplicações nos cascos de navios e submarinos para alcançar maiores velocidades com um menor custo energético.

A primeira utilização comercial dos polímeros redutores de atrito, foi em 1979, na tubulação de transporte de óleo cru da Trans Alaska Pipeline System (TAPS). Lá demonstraram o poder de redução de atrito do polímero Conoco CDR. Ele foi responsável por aumentar a vazão em aproximadamente 200.000 B/D (ou 1.325 m<sup>3</sup>/h).

Atualmente as dificuldades giram em torno dos tipos ideais de polímeros para cada aplicação e suas concentrações, como mostrado no trabalho de Winkel *et al.* (2006), no qual o experimento foi realizado com escoamentos em velocidades até 18 m/s utilizando uma vasta quantidade de polímeros e de concentrações. Os

resultados sugeriram que quanto maior o peso molecular do polímero utilizado e quanto maior seu fluxo, maior é a redução de atrito no escoamento. Com relação aos polímeros em si e sua constituição molecular, as dificuldades são devido ao fato de que eles se degradam ao longo das tubulações (Edson J. Soares *et al.* - 2015), e uma vez que têm sua cadeia polimérica quebrada, o efeito de redução de atrito é cessado. Essa degradação é mais acentuada ao passarem por bombas, válvulas, restrições ou curvas acentuadas (joelhos e T's) que provocam a quebra de sua cadeia e assim, não mais são úteis para o sistema.

Este trabalho tem a finalidade de quantificar a degradação de polímeros devido a turbulência do escoamento. A contribuição deste trabalho, vem por meio de um aparato experimental do tipo “roda” (em inglês “wheel”), que visa obter um sistema de escoamento turbulento, onde não haja bombas, válvulas ou restrições então com isso, será possível, estudar a degradação do polímero, apenas pela influência do cisalhamento e da turbulência do escoamento.

O presente documento está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura relacionada ao objeto de estudo; no capítulo 3, é apresentada a metodologia; no capítulo 4, são apresentados os cálculos realizados; no capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos neste trabalho; no capítulo 6, é apresentada a conclusão e no capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 Revisão da Literatura

O fenômeno da redução de atrito através de aditivos poliméricos foi descoberto por Toms (1948) e desde então vem sendo estudado e discutido por diversos outros pesquisadores. Este fenômeno, como dito na introdução deste trabalho, ainda não é completamente entendido, com isto surgem diversas teorias diferentes com relação ao assunto. Pode-se dizer que a teoria para explicar este fenômeno, se divide basicamente em duas classes: uma baseada nos efeitos viscosos, defendida por Lumley (1973), e outra baseada nos efeitos elásticos, defendida por Tabor e De Gennes (1986).

Lumley (1973) defende que o estiramento das moléculas de polímero provoca um aumento da viscosidade extensional da solução em certos níveis do escoamento turbulento. Este aumento nesta região provoca a supressão dos vórtices pequenos, diminuindo o domínio turbulento e então reduzindo o arrasto sofrido pela solução. Com isso, este efeito de redução seria sentido em todos os níveis de concentração, ainda que baixos.

Seguindo a mesma linha de pensamento de Lumley, Oldroyd (1949) propõe que a redução de atrito é dada a um aumento da viscosidade efetiva em regiões de alta turbulência. Assim como Kostic (1994), que diz que a adição de polímeros redutores de atrito gera a laminarização do escoamento turbulento, onde os vórtices presentes no escoamento turbulento, são alongados causando uma diminuição no fluxo não linear. Isto significa que as instabilidades de grande escala ainda se encontram presentes no escoamento, porém as de pequena escala, que representam parcela mais significativa, podem até se extinguir. Posteriormente, corroborando o trabalho de Kostic, Sureshkumar e Beris (1996) e Kawaguchi (2002), demonstraram por meio de visualizações experimentais e simulações numéricas que a adição do polímero na solução causa uma redução nas flutuações de vorticidades em regiões próximas às paredes da tubulação através da qual o fluido escoar, assim como Ptasinski *et al.* (2003) mostrou também que as tensões poliméricas dissipam energia turbulenta.

Ainda nesta linha de pensamento sobre os efeitos viscosos, Liberatore *et al.* (2004) sugeriram que a redução do arrasto nem sempre se correlaciona com o peso molecular do polímero, apesar de reconhecer que a distribuição das moléculas do polímero pode exercer um papel importante no fenômeno. Além disso, Min *et al.* (2004), Ptasiński *et al.* (2001) e Warholic *et al.* (1999), sugerem que a máxima redução de atrito ocorre quando as tensões de Reynolds são drasticamente reduzidas e os mecanismos responsáveis pela turbulência são contidos pelas tensões flutuantes do polímero, isto explica mais sobre os limitadores da redução de atrito dos polímeros.

Além disto, Fontaine *et al.* (1992) e McComb e Rabie (1979), mostraram através de experimentos que a redução de atrito devido a adição polimérica se dá principalmente na região da camada limite mais próxima às paredes da tubulação, isto é, os efeitos mais distantes da camada limite não são tão expressivos quando comparados aos efeitos próximos as paredes.

Já a teoria da cascata de Tabor e De Gennes (1986) considera que o efeito do polímero é sentido apenas nas pequenas escalas do escoamento turbulento, onde a tensão do polímero se compara aos tensores de Reynolds. De acordo com o autor, a formação de novos vórtices nessas escalas, responsáveis pela dissipação de energia, é fortemente restringida, devido ao aumento do módulo elástico da solução. O estiramento das moléculas do polímero interrompe a cascata de Kolmogorov e o resultado líquido observado também é uma retração do domínio turbulento. De acordo com a teoria proposta, seria necessária uma concentração mínima para que o efeito elástico da adição do polímero no escoamento seja sentido. Na maioria dos casos essa concentração é muito pequena, porém a existência de uma concentração mínima, revela uma significativa diferença entre as duas teorias.

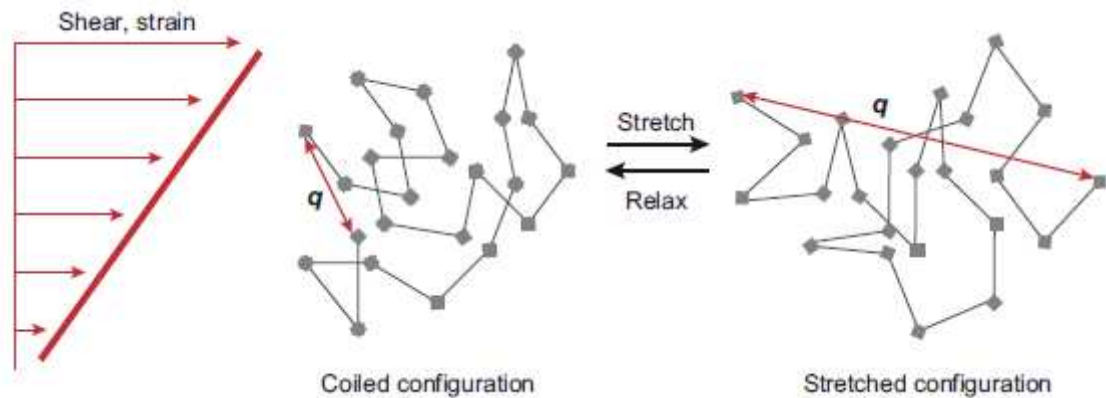


Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes

A Figura 1 representa um esquema básico de uma estrutura polimérica da molécula do óxido de polietileno. O vetor  $q$  representa a distância dos extremos da cadeia, indo do período de relaxação ao de estresse cisalhante ao longo do fluxo do escoamento. Assim, o alongamento da cadeia polimérica é caracterizado pela mudança no vetor  $q$ .

Seguindo esta linha de pensamento de Tabor e De Gennes, Elperin *et al.* (1967) sugeriram que a redução, deve-se a transferência de energia do escoamento para os polímeros, de modo a alongar a cadeia polimérica. Bushnell & Moore (1991) realizaram um estudo onde buscaram relacionar a redução de atrito à elasticidade das cadeias poliméricas de diferentes pesos moleculares, que posteriormente (Liberatore *et al.* - 2004) foi dito que nem sempre o aumento do peso molecular leva ao aumento da redução de atrito.

Min *et al.* (2003) realizaram estudos em um canal de seção retangular, e concluíram que a eficiência da redução de atrito ocasionada pela adição de polímeros está diretamente relacionada ao tempo de relaxamento das moléculas da cadeia polimérica. Esta relação ocorre de modo que quando o tempo de relaxamento da molécula é relativamente longo, a energia elástica nas regiões próximas às paredes é transportada para a camada de amortecimento e logarítmica do escoamento, resultando em uma redução de arrasto significativa.

Ainda nesta linha sobre os efeitos elásticos, Baik *et al.* (2005) utilizando a técnica PIV (Velocimetria por Imagem de Partícula), concluíram que ao longo do escoamento ocorre uma separação dos filamentos poliméricos e que estes possuem um comportamento próximo ao de um corpo sólido no momento em que interagem

com regiões de altas tensões cisalhantes, isto é, próxima às paredes. Além disso, a injeção de polímeros distribuída de forma heterogênea no escoamento pode ocasionar uma maior eficácia no fenômeno de redução de atrito.

Todos estes estudos, têm forte influência da turbulência, pois é essencial entender este fenômeno com um certo grau de profundidade para que então seja possível compreender os efeitos dos polímeros. Como tal efeito polimérico só interessa quando estamos no meio turbulento, a compreensão acerca da turbulência é necessária para este tema, pois os grandes efeitos de redução de atrito ocorrem para escoamentos altamente turbulentos.

Apesar de se saber quando ela está ocorrendo, ainda é difícil prever com precisão o seu comportamento. Os movimentos turbulentos são caracterizados por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares. Como consequência destas flutuações, o estado turbulento em um fluido contribui significativamente no transporte de momentum, calor e massa. Define-se turbulência como um estado de escoamento do fluido no qual as variáveis instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias tal que, na prática, apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e submetidas a uma análise. O estudo dos fenômenos de transporte fica dificultado, sobremaneira, pela presença destas flutuações. Qualquer simplificação na análise dos efeitos da turbulência é extremamente vantajosa do ponto de vista físico, matemático e numérico. A busca constante por tais simplificações é um dos principais objetivos no desenvolvimento de novos modelos de turbulência (Rev. Bras. Geof. Vol. 29 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2011).

Kolmogorov (1941) propôs uma teoria baseada na ideia de que o campo turbulento de velocidades pode ser representado por uma cadeia de vórtices de diferentes tamanhos e que a energia entra no sistema para produzir os grandes turbilhões. Sua teoria baseia-se na hipótese de que os grandes turbilhões alimentam com energia os turbilhões menores e estes por sua vez, transferem a energia para os menores ainda, formando um efeito cascata. A cascata de energia, faz com que escoamentos turbulentos, apesar de ocorrerem a Reynolds elevados, possuam considerável dissipação de energia, onde os efeitos viscosos tendem a ser menos relevantes.

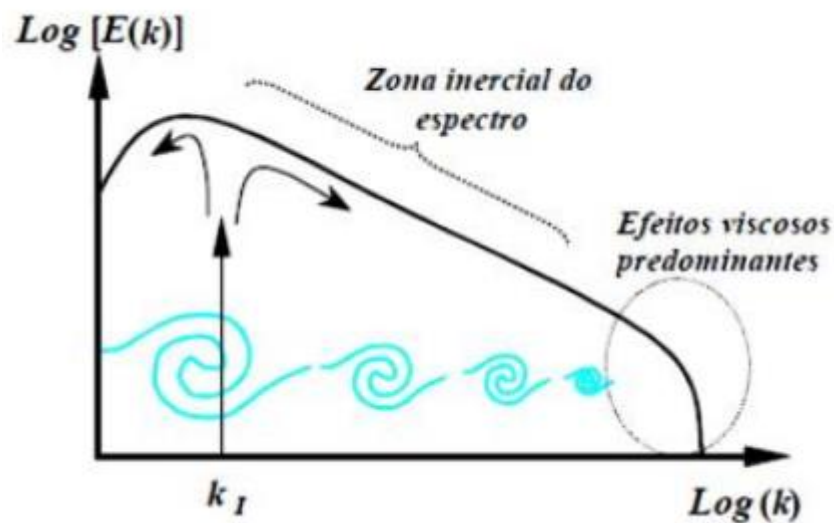


Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda

Na Figura 2, pode ser observado o gráfico que mostra a relação dos vórtices (ou turbilhões) com os efeitos de viscosidade. Assim, os pequenos vórtices dissipam energia cinética por meio da ação da viscosidade. A energia cinética destes turbilhões é pequena, mas eles são constantemente re-energizados pela transferência de momento dos grandes turbilhões.

Virk (1975), defende uma explicação fenomenológica para os mecanismos que limitam os valores máximos da redução de atrito. Esta explicação afirma que a máxima redução de atrito ocorre quando o efeito da adição do polímero é percebido em todas as regiões do escoamento, causando a expansão da espessura da camada intermediária através de toda a camada limite do escoamento.

Ao plotarmos o gráfico do fator de atrito em coordenadas Prandtl-Kármán, é possível determinar o início da redução de atrito como o ponto de partida da lei Prandtl-Kármán, que corresponde ao comportamento turbulento de fluidos Newtonianos. O aumento na redução de atrito pode ser percebido inicialmente conforme a concentração de polímero na solução é aumentada para um mesmo número de Reynolds, porém em certo ponto a redução de atrito atinge uma assíntota que corresponde ao valor máximo de saturação que limita este fenômeno, como pode ser confirmado no gráfico da Figura 3.

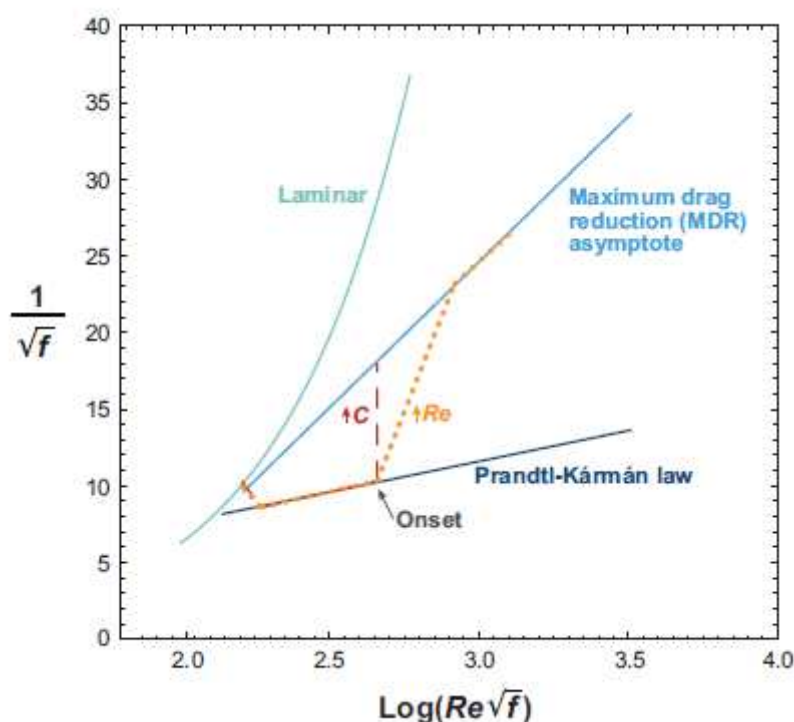


Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito

Como dito na tese de dissertação de Rafael Milanezi De Andrade (2013), o início da redução de arrasto é outro ponto que gera dúvidas entre os pesquisadores. Lumley (1969), Ryskin (1987) e L'vov et al. (2004), defendem a teoria viscosa, e acreditam que o início da redução de arrasto ocorre quando os vórtices da subcamada de transição estão aptos a esticar as macromoléculas, o que provoca um aumento da viscosidade extensional da região, suprimindo as flutuações turbulentas e aumentando a espessura da subcamada de transição. Já Tabor e De Gennes (1986) e Joseph (1990) defendem que o início da redução de arrasto é sentido quando a energia armazenada pelas moléculas parcialmente esticadas do polímero é comparável à energia cinética turbulenta de algumas escalas na região da subcamada de transição. A cascata de Kolmogorov é, então, prematuramente interrompida, retraindo o domínio turbulento.

No gráfico 3 podemos observar a máxima redução de arrasto (MDR) que posteriormente, em homenagem ao pesquisador, foi chamada de lei de Virk ou assíntota de Virk, corroborando a sua importância para este fenômeno.



A MDR é atingida quando, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, a adição de maiores quantidades de polímero na solução não mais tem influência na redução de arrasto nas coordenadas Prandtl-von Kármán. A interpretação da lei de Virk ainda não é totalmente compreendida, as opiniões se dividem entre as teorias viscosa e elástica, explicadas acima.

Recentemente, Dubief *et al.* (2004) apresentaram uma proposta interessante para descrever a interação das moléculas de polímeros flexíveis com o escoamento turbulento. Segundo os autores, as macromoléculas trabalham de forma cíclica e organizada, armazenando energia dos vórtices e cedendo energia para o escoamento. As moléculas são esticadas quando compelidas a girar em torno dos vórtices na região da subcamada de transição. O polímero se estende e absorve as flutuações que provocam o vórtice, a molécula é então compelida à região da subcamada viscosa, voltando a encolher e cedendo a energia armazenada para o escoamento na direção principal. Esse ciclo ocorre inúmeras vezes.

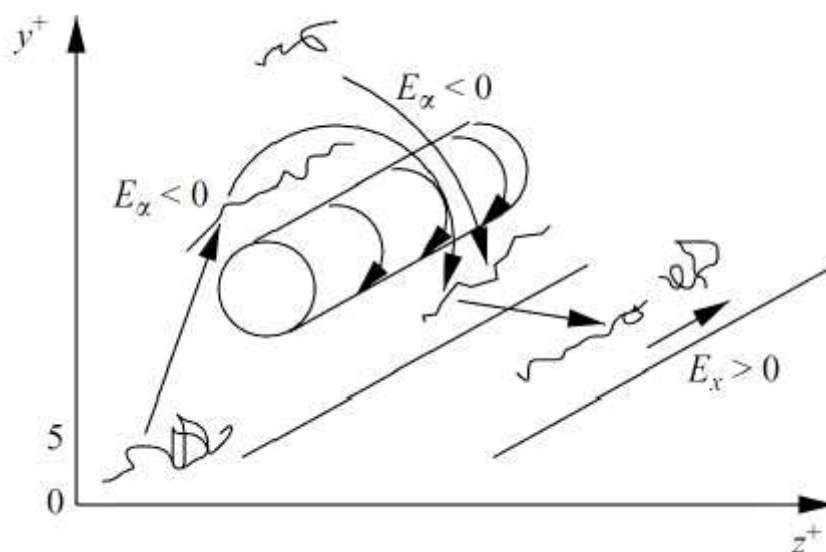


Figura 4: Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede

Outro aspecto importante para a compreensão do assunto e que é tema deste presente trabalho, é o mecanismo de degradação dos polímeros. Isto é, a quebra das macromoléculas, devido às tensões exercidas pelo escoamento. A redução do número de monômeros das cadeias poliméricas afeta consideravelmente a eficiência da redução de arrasto. Merrill e Horn (1984), utilizando técnicas de cromatografia de

permeação em gel, constataram que as cisões poliméricas ocorrem próximas ao ponto médio das macromoléculas. Os autores sugerem, ainda, que a degradação ocorre quando as macromoléculas se encontram esticadas e alinhadas com o escoamento. Resultados experimentais apresentados por Choi *et al.* (2000), Nakken *et al.* (2001), Vanapalli *et al.* (2005) e Pereira e Soares (2012) mostram que, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, após um longo período de tempo, a redução de arrasto tende a um regime permanente, a partir do qual nenhuma degradação adicional é observada.

Importantes resultados experimentais obtidos por Choi *et al.* (2000), Elbing *et al.* (2011) e Pereira e Soares (2012) revelam que, em um escoamento com Reynolds constante, a eficiência da solução em reduzir o arrasto varia com o tempo. A figura 5, abaixo, ilustra este comportamento.

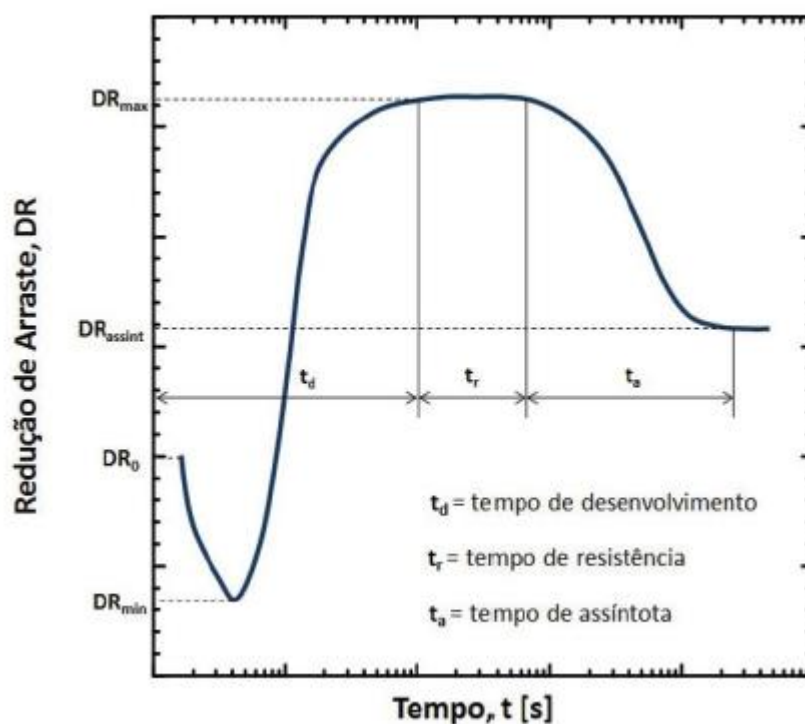


Figura 5: Redução de arrasto em função do tempo

### **3 Metodologia**

A metodologia deste trabalho é baseada nas pesquisas acerca do tema dos polímeros redutores de atrito. A partir do estudo e entendimento do assunto, com o auxílio da literatura, de trabalhos e publicações de artigos científicos, serão realizados experimentos simplificados para tentar caracterizar a influência dos polímeros na perda de carga induzida pelo escoamento turbulento e as propriedades da solução polimérica.

Estes testes serão executados em uma bancada experimental, do tipo “roda”, na qual consiste de uma tubulação presa à um aro de roda, de forma que se possa simular um escoamento turbulento através deste aparato, sem passar a solução de fluido e polímero por bombas ou reduções, e com isso analisar a degradação da solução polimérica devida apenas a turbulência do escoamento.

No aparato, a tubulação é preenchida parcialmente com o fluido de trabalho e colocada para girar com o auxílio de um motor elétrico. Um controlador do tipo PID é utilizado para controlar a velocidade de giro da roda. Nas velocidades de giro utilizadas nesse trabalho, o escoamento era sempre turbulento. Nos ensaios, a velocidade de giro é mantida constante para a avaliação da redução de arrasto e degradação do polímero, que serão feitas a partir das medições de torque aplicado à roda. O fluido de trabalho é a água e o polímero utilizado é o Superfloc A110 (Poliacrilamida), diluído em diferentes concentrações.

#### **3.1. Aparato Experimental**

O aparato experimental tem a função de reproduzir um escoamento desenvolvido constante em regime turbulento através da tubulação de seção circular, para que se possa estudar a degradação do polímero devido apenas ao escoamento turbulento, sem precisar de bombas no sistema.

A utilização de um controlador de velocidade é necessária, pois com as variações na redução de atrito, o torque aplicado à roda também se altera e

consequentemente, se alteraria a velocidade. Como é necessário a comparação em velocidade constante, o controlador atua para não deixar a velocidade sair da faixa requerida.

Este aparato tipo roda, já foi utilizado em diversas pesquisas, como por exemplo nos trabalhos de Olav Urdahl *et. al.* (1996), de Einar Eng Johnsen *et. al.* (2001), de Einar Eng Johnsen e Hans Petter Ronningsen (2003) e de José F. Roca R. *et. al.* (2014), onde foi estudada a viscosidade da emulsão água-óleo em condições de escoamento, e com isso utilizado um aparato tipo roda.

Abaixo pode-se ver a figura do aparato experimental montado no Laboratório de Fluidos da PUC-Rio.



Figura 6: Aparato Experimental tipo roda

### 3.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental adotado, foi desenvolvido, para se obter os melhores resultados dentro das faixas esperadas e com incertezas satisfatórias.

Antes de iniciar os testes com polímeros, foram realizados testes preliminares para garantir a repetibilidade dos resultados. Para isso, decidiu-se plotar três gráficos torque vs. velocidade, onde para cada velocidade, adotou-se um tempo de seis minutos para coleta dos dados e a velocidade máxima foi definida em 2,5 m/s, pois o sistema se aproximava do seu torque máximo possível.

Os procedimentos adotados antes da realização de cada um dos testes, eram: realizar a limpeza da seção tubular com água deionizada, para garantir que nenhuma substância contaminada estaria presente na parte interna da seção tubular; deixar o aparato ligado e girando por uma hora, antes de se iniciarem os testes (pois foi verificado que se os testes fossem realizados com o aparato ainda frio, os resultados encontrados divergiam em certo grau) e regulação da tensão da fonte em 15 V, para garantir que a velocidade final de 2,5 m/s fosse atingida com o fluido dentro da seção.

Após estes procedimentos e verificações, os testes preliminares eram iniciados, com e sem água. O teste com o sistema vazio, era necessário para medir o torque necessário para vencer as resistências mecânicas do próprio sistema, como do eixo do motor e atritos internos. Depois era realizado o teste com água, e assim pôde-se obter o torque devido apenas ao fluido, diminuindo-se um do outro.

Com o auxílio do software Labview, foi possível gravar os dados e depois extrair uma planilha Excel e gerar os gráficos, que podem ser analisados abaixo.

Ar						
	Velocidade Regulada [m/s]	Velocidade Medida [m/s]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]
1o teste	0,75	0.746894737	0.125815789	1.3601316	0.171052632	0.079071738
	1,0	0.999105263	0.133289474	1.7475526	0.233157895	0.080448603
	1,5	1.501921053	0.153315789	2.5026842	0.383605263	0.088137098
	2,0	2.007	0.170947368	3.2642368	0.558105263	0.095924852
	2,5	2.507552632	0.188342105	4.0159737	0.756552632	0.10407751
2o teste	0,75	0.747052632	0.119052632	1.3595789	0.161868421	0.07475493
	1,0	0.993894737	0.131421053	1.7291579	0.227263158	0.078895525
	1,5	1.502631579	0.145157895	2.5064474	0.363947368	0.083538456
	2,0	1.992552632	0.161526316	3.2545	0.5255	0.09101913
	2,5	2.511631579	0.182210526	4.0572895	0.739289474	0.10155497
3o teste	0,75	0.749315789	0.121210526	1.3684474	0.165789474	0.076372091
	1,0	1.000236842	0.127	1.7542105	0.222947368	0.076859185
	1,5	1.50025641	0.136923077	2.5024103	0.342846154	0.078800134
	2,0	1.997526316	0.1595	3.2625263	0.520289474	0.089877841
	2,5	2.510236842	0.180473684	4.0378158	0.728710526	0.100157371

Tabela 1: Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico

Com a ajuda do software, obtinham-se as medidas de velocidade, corrente, tensão e potência. Para o cálculo do torque, era necessário realizar a seguinte operação:

$$\tau = \frac{P}{\omega}$$

Onde,  $P$  é a potência elétrica fornecida ao motor e  $\omega$  é a velocidade angular do escoamento do fluido.

O teste com ar, teve como principal objetivo a medição do torque necessário para vencer as resistências mecânicas do próprio sistema, para que após isto, fosse possível subtraí-lo do valor de torque encontrado com a seção de testes com o fluido a ser estudado. Além de verificar a repetibilidade dos resultados encontrados. Depois de extraídos os dados, foram plotados os três gráficos de torque vs. velocidade, dos três testes realizados, para assim garantir os resultados esperados.

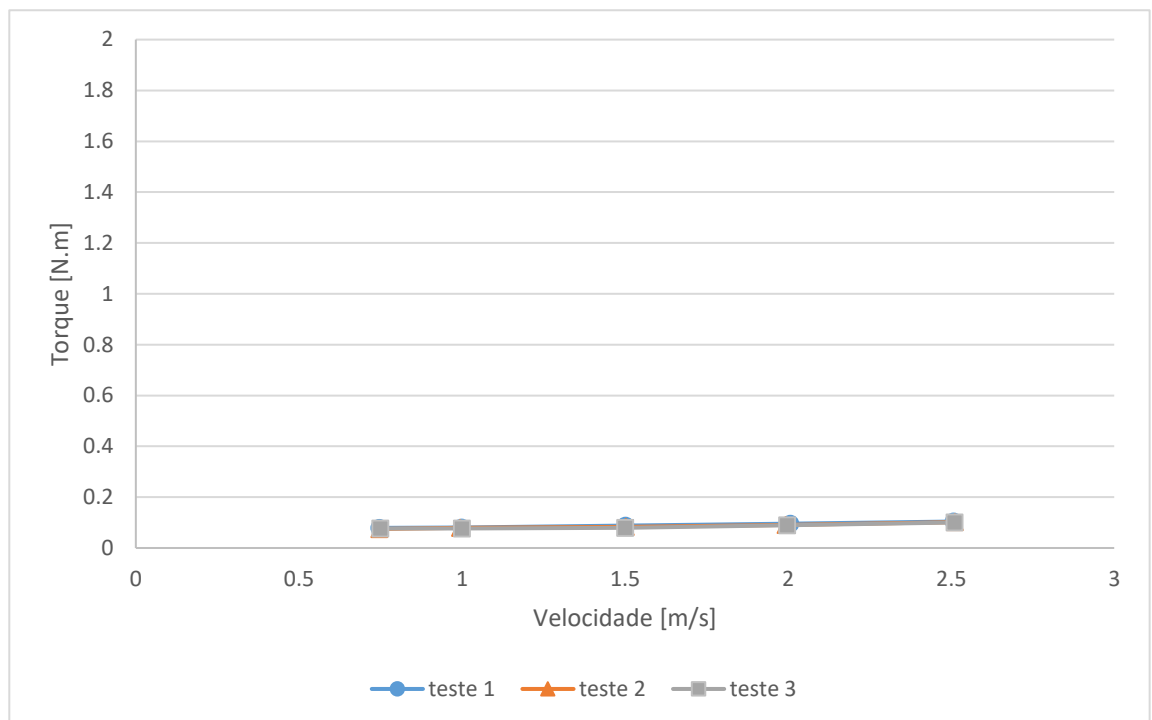


Gráfico 1: Repetibilidade dos testes de ar Torque vs Velocidade

Pôde-se então concluir que os resultados estão dentro das incertezas associadas e confirmam a exatidão dos pontos encontrados, além de confirmar a repetibilidade do sistema.

Após estes testes, foram realizados os testes com água deionizada, com os mesmos dois objetivos finais. Descobrir o torque do sistema ar-água, para que depois fosse possível calcular apenas o torque devido ao fluido e também garantir a exatidão dos resultados encontrados com o sistema preenchido com o líquido.

Desta forma, os procedimentos realizados são os mesmos descritos acima, com a diferença de que agora o sistema da roda, foi preenchido com 450 ml de água deionizada. Abaixo, tem-se as tabelas com os testes com água.

Água deionizada						
	Velocidade Regulada [m/s]	Velocidade Medida [m/s]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]	Torque [N.m]
1o teste	0,75	0.74425641	0.312435897	1.809794872	0.565717949	0.262194975
	1,0	0.998538462	0.392128205	2.350179487	0.921615385	0.318500396
	1,5	1.490794872	0.665846154	3.714923077	2.473666667	0.572457234
	2,0	1.98025641	1.079564103	5.495205128	5.932641026	1.033573303
	2,5	2.495615385	1.640153846	7.795538462	12.78648718	1.76761431
2o teste	0,75	0.750684211	0.344157895	1.933684211	0.665578947	0.305907888
	1,0	1.000289474	0.413184211	2.455315789	1.014421053	0.349963149
	1,5	1.493868421	0.667447368	3.775684211	2.520078947	0.58200635
	2,0	1.981447368	1.062157895	5.522631579	5.866236842	1.021367701
	2,5	2.495526316	1.639605263	7.8415	12.85813158	1.777524063
3o teste	0,75	0.751	0.311189189	1.797108108	0.559324324	0.256949107
	1,0	0.997973684	0.384894737	2.332447368	0.897894737	0.310433017
	1,5	1.4945	0.654842105	3.720315789	2.436131579	0.562407882
	2,0	1.985684211	1.071763158	5.506552632	5.902210526	1.025402027
	2,5	2.497052632	1.632315789	7.777342105	12.6965	1.754030352

Tabela 2: Cálculo do Torque devido às Resistências do Sistema Mecânico e da água

O mesmo gráfico foi plotado para garantir a exatidão dos pontos estudados e repetibilidade do sistema. Com isso, pôde-se analisar o comportamento estável em diferentes dias, o que contribui para resultados mais precisos.

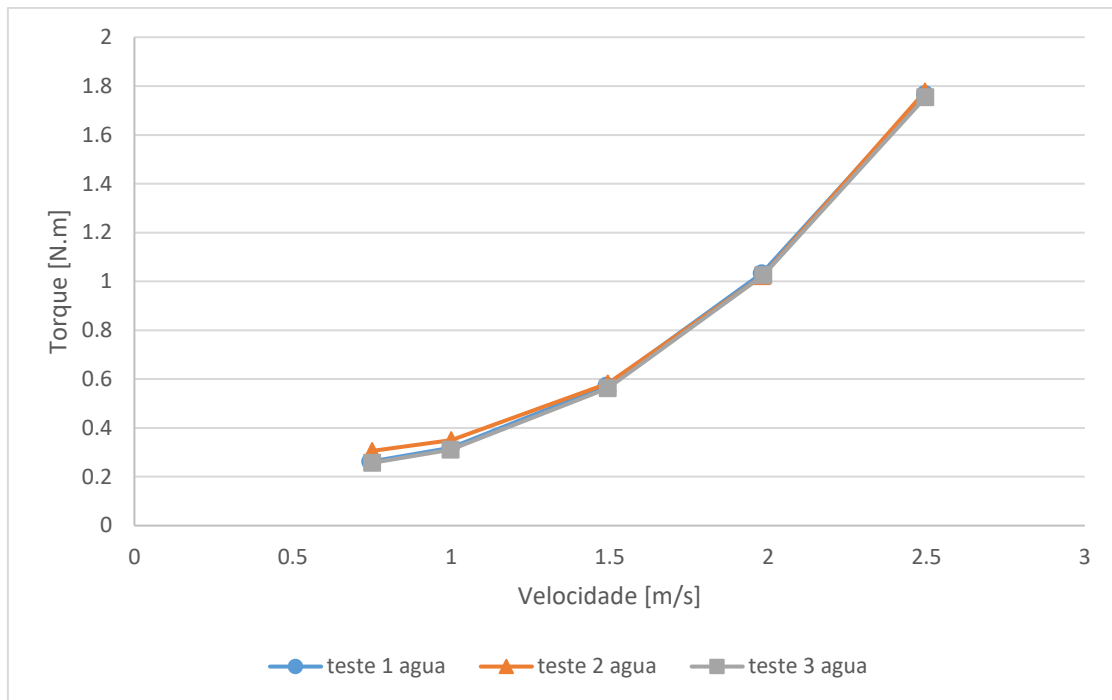


Gráfico 2: Repetibilidade dos testes de água Torque vs Velocidade

Depois de confirmadas as exatidões do aparato experimental, pôde-se calcular o torque devido apenas ao fluido que escoar dentro da tubulação, neste caso, água deionizada, calculando a diferença de torques em cada ponto. Este resultado também pode ser plotado em um gráfico que analisa os torques e velocidades médios de ambos os testes, para assim obter um resultado mais preciso.



Torque devido apenas ao fluido	
	Torque [N.m]
1o teste	0.183123237
	0.238051792
	0.484320136
	0.937648451
	1.6635368
2o teste	0.231152958
	0.271067625
	0.498467894
	0.930348571
	1.675969093
3o teste	0.180577016
	0.233573833
	0.483607748
	0.935524186
	1.653872981

Tabela 3: Torque devido apenas ao fluido na tubulação

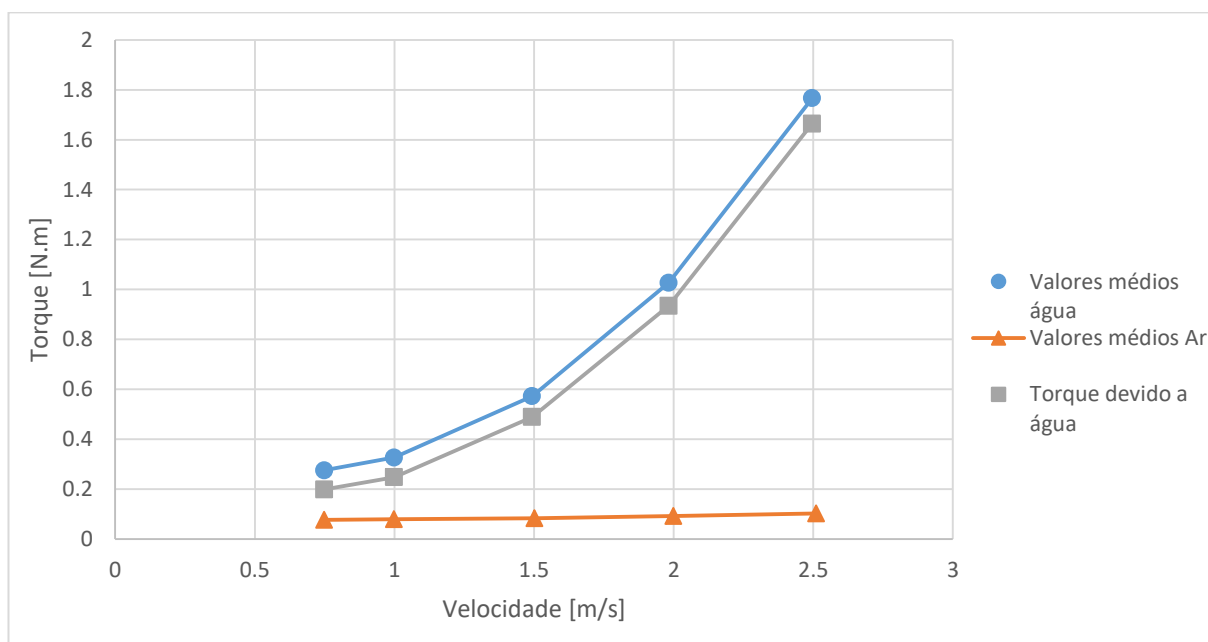


Gráfico 3: Torque devido apenas ao fluido

Neste ponto tem-se o torque de referência, aquele devido apenas ao fluido escoante. Será necessário, após cada teste da solução água-polímero, subtrair o torque do ar, para se chegar ao torque líquido.

### **3.3. Caracterização dos fluidos de trabalho**

Para este estudo foram definidas, inicialmente, soluções com duas concentrações de polímeros, sendo elas de 80 ppm e 40 ppm. Para a preparação das misturas, foi utilizado um recipiente com 10 L de capacidade. Adicionou-se para cada ppm, 0,7976 gramas e 1,5952 gramas, respectivamente, do polímero Superfloc A110, para se obter a concentração adequada da mistura. A massa de polímero foi medida com uma balança de precisão GEHAKA, AG200 com resolução de 10 mg. A mistura foi agitada suavemente por 7 horas e após esse tempo foi deixada em repouso por 24 horas, em recipiente fechado, para que ficasse completamente homogênea. Após obter-se a solução homogeneizada, foram analisadas a viscosidade dinâmica e a densidade desta solução.

### **3.4. Densidade**

Para o cálculo da densidade de cada solução, foram medidos 50 mL de cada solução utilizando um béquer com resolução de 10 mL, e pesados na balança descrita na seção acima. Com isso, calculou-se a densidade, dividindo a massa pesada pelo volume colocado.

### **3.5. Viscosidade dinâmica**

Para a medição da viscosidade dinâmica, foi utilizado o viscosímetro rotacional Myr VR 3000, da Viscotech Hispania, S.L. Primeiro, coloca-se 18 mL da solução desejada no recipiente da máquina, depois adiciona-se um cilindro de metal dentro deste recipiente, que gira a 100 rpm, e com isso, a máquina faz o cálculo da viscosidade dinâmica. Além disso, o sistema é alimentado por um banho térmico, para que se mantenha a temperatura constante durante a medição.

### **3.6. Viscosidade extensional e tempo de relaxação**

Para a medição da viscosidade extensional, foi utilizado o reômetro extensional Haake CaBER 1, da Thermo Scientific. A medição é feita colocando-se uma pequena amostra da solução, com a ajuda de uma seringa, entre duas placas, e então ocorre o afastamento dessas placas, alongando a amostra e um laser

captura o diâmetro a cada instante de tempo. Assim, o instrumento calcula a viscosidade extensional da amostra.



Figura 7: Viscosímetro extensional

Para o tempo de relaxação, foi utilizada a correlação de Bazilevski (1990), que diz:

$$d_{min}(t) = Ae^{(-t/3\lambda)}$$

Onde,  $d_{min}(t)$  é a variação do diâmetro no tempo, A é uma constante, t o tempo e  $\lambda$  o tempo de relaxação do polímero.

Aplicando logaritmo dos dois lados, tem-se:

$$\ln(d_{min}(t)) = \ln(A) - \frac{t}{3\lambda}$$

Com isso, tem-se uma equação linear da forma:

$$D^* = A^* + B^*t$$

Onde,  $B^*$  é o coeficiente angular desta reta, e é igual a:

$$B^* = \frac{-1}{3\lambda}$$

Com isso, calculam-se os coeficientes angulares para cada amostra e posteriormente, obtêm-se seus tempos de relaxação.

## 4 Cálculos

Nesta seção serão apresentados todos os cálculos realizados neste presente trabalho, para que se fosse possível obter os resultados finais.

### 4.1. Coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito estimado para um escoamento turbulento e em uma seção tubular, pode ser calculado por diversos métodos teóricos. Porém aqui serão utilizadas as correlações de White e de Ito, que segundo White & Bond (1971), são as mais utilizadas para tubulações curvas. Nos trabalhos de White e Ito, que também utilizaram aparatos do tipo roda, os coeficientes de atrito experimentais foram comparados, respectivamente, com as correlações abaixo:

$$Cf = 0,08Re^{-0,25} + 0,012\left(\frac{D}{2R}\right)^{0,5}$$
$$Cf = 0,076Re^{-0,25} + 0,00725\left(\frac{D}{2R}\right)^{0,5}$$

Nota-se que ambas correlações, relacionam o coeficiente de atrito com o número de Reynolds, o diâmetro hidráulico e o raio da seção de testes. Tem-se abaixo, uma figura ilustrativa com estas medidas esquematizadas, e será apresentada uma equação para o cálculo do coeficiente de atrito experimental, de modo que possa ser comparado aos coeficientes teóricos de White e Ito, expostos acima.

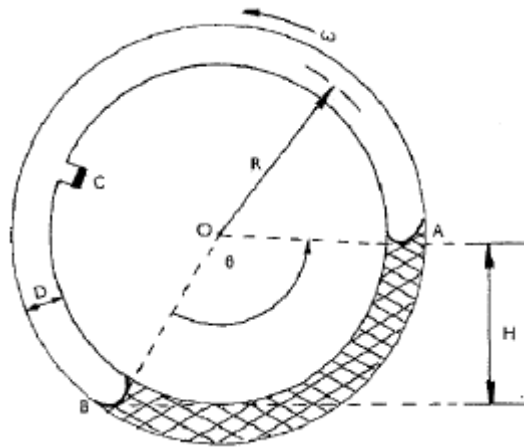


Figura 8: Esquema do aparato experimental

De posse deste esquema, um método de cálculo experimental para o coeficiente de atrito relacionado ao escoamento, também apresentado por White & Bond (1971), é definido por:

$$Cf = \frac{DHg}{2\theta R^3 \omega^2}$$

Onde, pode-se escrever que:

$$\theta R = L$$

Sendo este  $L$ , o comprimento da seção molhada. Assim, temos:

$$Cf = \frac{DHg}{2LR^2 \omega^2}$$

Para calcular  $L$ , basta calcular o volume de líquido na seção e a área da seção tubular. Como se sabe estas duas informações, tem-se:

$$V = A * L$$

Onde, o volume é de 450 ml e a área da seção é correspondente a um diâmetro de 1 polegada. Com isso, temos que:

$$L = 0,888 \text{ m}$$

Agora, é possível calcular os coeficientes de atrito para cada valor de Reynolds, além de comparar os três cálculos para os coeficientes de atrito, os teóricos e o experimental. Após juntar os dados necessários, foi montada a tabela abaixo e logo em seguida, plotados os gráficos.

Cálculos coeficientes de atrito							
Velocidade Regulada [m/s]	Velocidade Medida [m/s]	$\Delta H$ [m]	$\omega$ [rad/s]	Re	Coef. Teórico - White	Coef. Teórico - Ito	Coef. Experimental
0,75	0.7486468	0.03	2.169990	18902.21	0.009125	0.007872	0.007509
1,0	0.9989338	0.06	2.895460	25221.59	0.008650	0.007421	0.008436
1,5	1.4930544	0.12	4.327694	37697.39	0.008043	0.006845	0.007552
2,0	1.9824626	0.23	5.746268	50054.22	0.007650	0.006472	0.00821
2,5	2.496064	0.34	7.234970	63021.913	0.0073514	0.0061876	0.007656

Tabela 4: Cálculo dos coeficientes de atrito teóricos e experimental

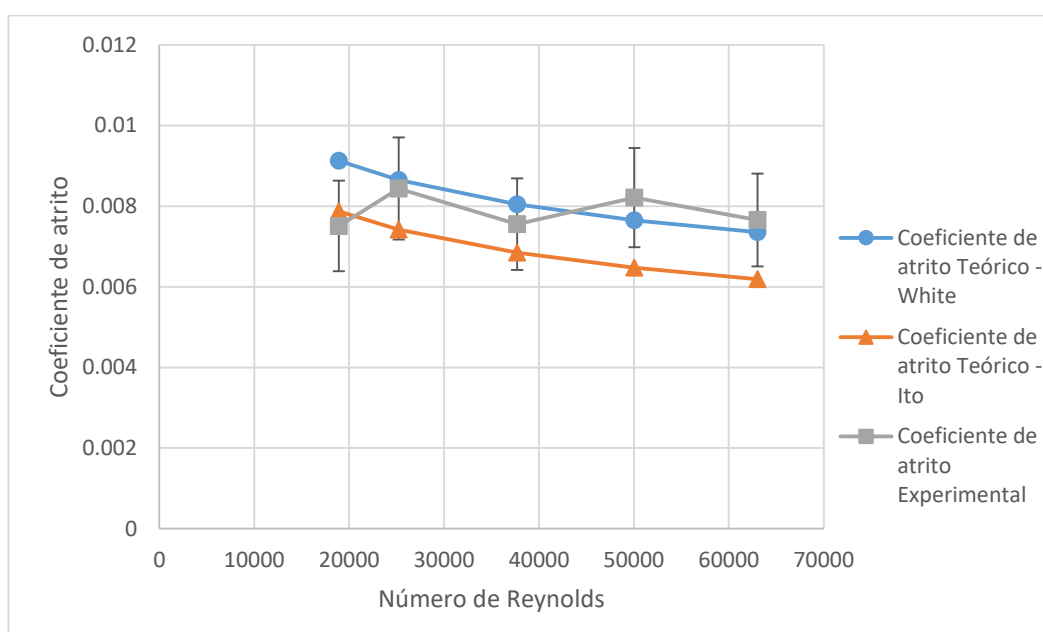


Gráfico 4: Comparação dos coeficientes de atrito

Neste gráfico pode ser analisado o comportamento dos coeficientes de atrito com relação ao número de Reynolds. Com a análise gráfica, percebe-se que os valores obtidos experimentalmente se aproximam bastante das curvas teóricas, corroborando os bons resultados encontrados experimentalmente. O cálculo da incerteza do coeficiente de atrito experimental, foi feito levando em conta as incertezas dos instrumentos utilizados para a medição do mesmo, chegando em um resultado de aproximadamente  $\pm 15\%$  de incerteza. Com isto, pode-se notar no gráfico que os resultados ficam dentro da margem dos coeficientes teóricos, levando-se em conta as suas incertezas associadas. No próximo tópico, será feita

uma análise da eficiência do motor elétrico utilizado, afim de obter um valor para o mesmo, pois este é mais uma fonte de possíveis divergências encontradas para o fator de atrito, por afetar diretamente o torque.

#### 4.2. Eficiência do motor elétrico

O cálculo da eficiência do motor elétrico é necessário, pois ele entra multiplicando o valor do torque, influenciando nos resultados. Além disto sabe-se que a eficiência varia com o torque aplicado pelo motor, com isto, o objetivo é chegar em uma equação que consiga modelar esta variação.

De posse da equação para o coeficiente de atrito, apresentada na seção anterior:

$$Cf = \frac{DHg}{2LR^2\omega^2}$$

E conhecendo esta outra modelagem para o coeficiente de atrito:

$$Cf = \frac{4T}{\pi L \rho R^2 \omega^2 \frac{D}{2} R}$$

Onde tem-se  $T$  que é o torque aplicado,  $\rho$  que é a densidade do fluido e os outros parâmetros que já foram apresentados na figura 7, pode-se igualar ambas equações e chegar em um valor de torque experimental:

$$T = \frac{D^2 H g R \pi \rho}{16}$$

Como tem-se o valor do torque nominal, basta calcular a razão do torque experimental pelo nominal, para chegar em um valor de rendimento para o conjunto motor elétrico e caixa de redução. Abaixo tem-se a tabela com os valores de torque experimental, nominal e os rendimentos, respectivamente. Assim como, o gráfico plotado de rendimento vs. velocidade, onde chega-se a uma equação que modela este rendimento, podendo ser aplicada a qualquer velocidade, e consequentemente, a qualquer torque.

Torque experimental [N.m]	Torque nominal [N.m]	Rendimento [%]
0.01282336	0.198284403	6.467155204
0.02564672	0.247564417	10.35961492
0.05129344	0.488798593	10.49377826
0.098312428	0.934507069	10.5202444
0.145331415	1.664459625	8.731447284

Tabela 5: Cálculo dos rendimentos associados

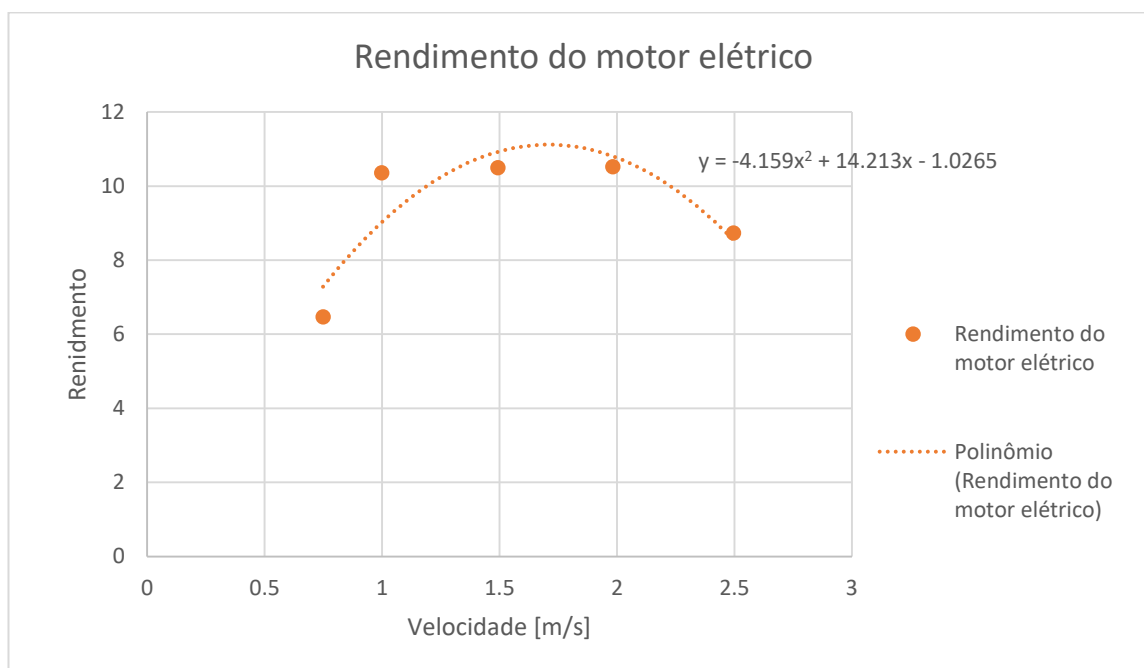


Gráfico 5: Rendimento do motor elétrico

É importante salientar que como os testes eram de muito longa duração (~7hrs), com o passar do tempo rendimento caiu, devido à perda de lubrificação do conjunto. Com isso, para os cálculos da amostra de 40 ppm, que foram realizadas posteriormente, foi necessário refazer o ajuste de rendimento. Obteve-se nesses casos, um rendimento aproximadamente 60% menor do que aquele observado inicialmente. A Figura a seguir, ilustra a diferença, entre testes iniciais e finais, do torque total medido para a água a uma velocidade tangencial de 2,5 m/s. Nota-se uma diferença considerável de torque. De qualquer maneira, essa queda de rendimento não é refletida nos resultados obtidos, uma vez que os torques de referência para ar e água eram medidos antes de cada ensaio com a solução polimérica.



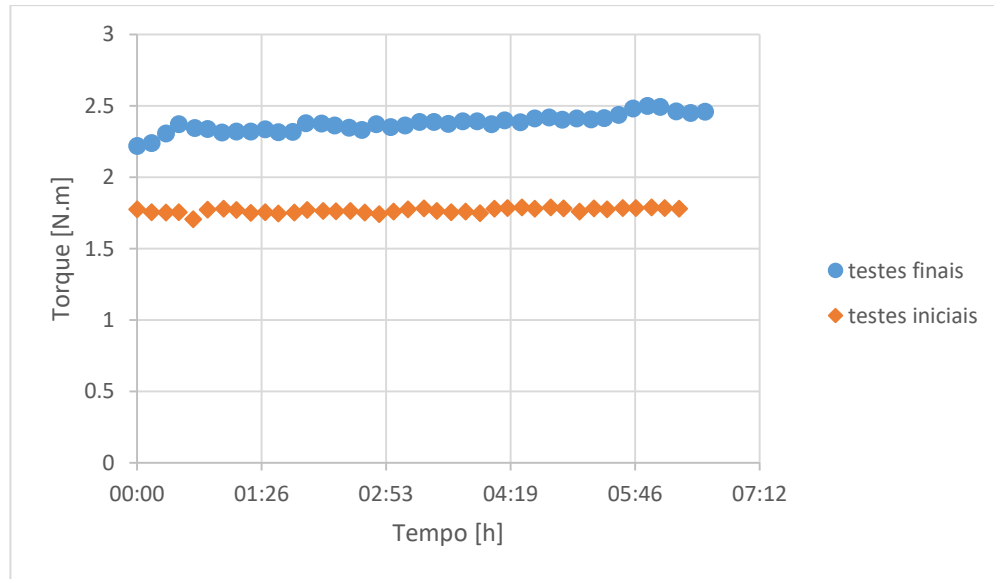


Gráfico 6: Diferença no torque da água

#### 4.3. Assíntota de Virk (curva de máxima redução de atrito)

Nesta seção serão apresentados como os resultados obtidos são comparados com a correlação proposta por Virk para máxima redução de atrito.

Para a solução de 80 ppm, encontrou-se uma viscosidade de 2,88 mPa.s e densidade de 990 kg/m<sup>3</sup>. Para a solução de 40 ppm, encontrou-se uma viscosidade de 1,73 mPa.s e densidade de 990,4 kg/m<sup>3</sup>. Com base nesses dados foram calculados os Reynolds esperados para o escoamento. As correlações de White e Prandtl- von Kármán, foram utilizadas para o cálculo dos fatores de atrito.

Para o cálculo da assíntota de Virk (MDR) e da lei de Prandtl-von Kármán, utilizam-se as seguintes correlações, respectivamente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19 \cdot \log(Re\sqrt{f}) - 32,4$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \cdot \log(Re\sqrt{f}) - 0,4$$

Além disso, para uma análise mais completa, ainda foram plotados no mesmo gráfico, a correlação para escoamento laminar de Poiseuille e de White, que estão representadas abaixo.

$$\frac{1}{f} = \frac{Re}{16}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,08 \cdot Re^{-0,25} + 0,012 \cdot \left(\frac{D}{2R}\right)^{0,5}$$

Com isso, pode-se plotar o gráfico abaixo:

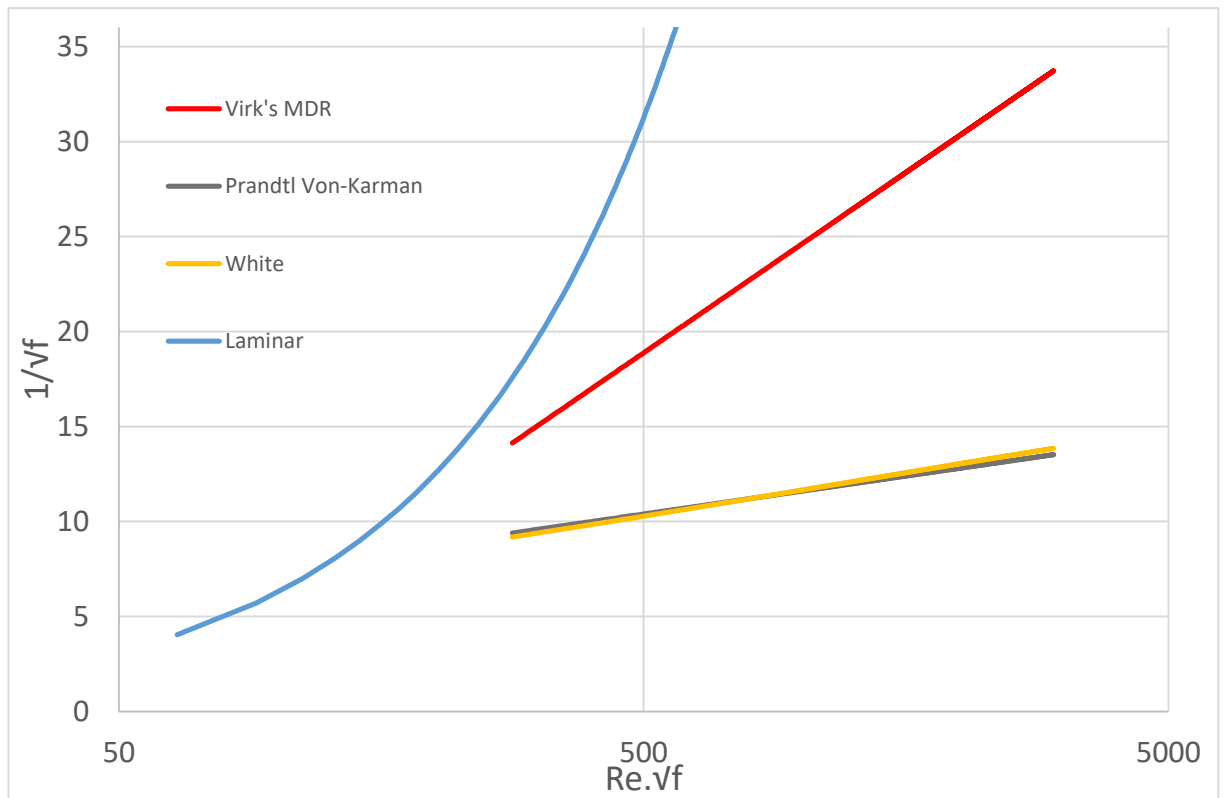


Gráfico 7: Assíntota de Virk

Pelo gráfico pode-se analisar como os resultados obtidos com as soluções poliméricas se comparam com as correlações de fatores de atrito disponíveis na literatura. Além disso, curva de máxima redução de atrito, indica o limite onde um aumento da concentração de polímero não causa mais redução do atrito do escoamento. As curvas dadas pelas correlações de White e de Prandtl-von Kármán ficaram bem próximas na faixa de parâmetros investigada neste trabalho. Sabendo que a correlação de White é utilizada para escoamentos em tubulações curvas circulares, enquanto a correlação de Prandtl-von Kármán é utilizada para escoamentos em tubulações retas circulares, pode-se concluir que utilizando Prandtl-von Kármán, tem-se uma boa aproximação dos resultados para o aparato

circular tipo roda. Isso é interessante do ponto de vista prático, pois sugere que os resultados obtidos na roda podem ser extrapolados diretamente para tubulações.

## 5 Resultados

### 5.1. Redução de Arrasto

Após as análises realizadas, coloca-se 450 ml da solução de polímero (primeiro de 80 ppm e posteriormente de 40 ppm) no aparato, define-se a velocidade em 2,5 m/s e se deixa o sistema rodando por aproximadamente 7 horas, para que se consiga analisar todas as fases da redução de arrasto. Este teste foi realizado duas vezes para garantir a repetibilidade dos resultados. Abaixo tem-se o gráfico da redução de arrasto pelo tempo.

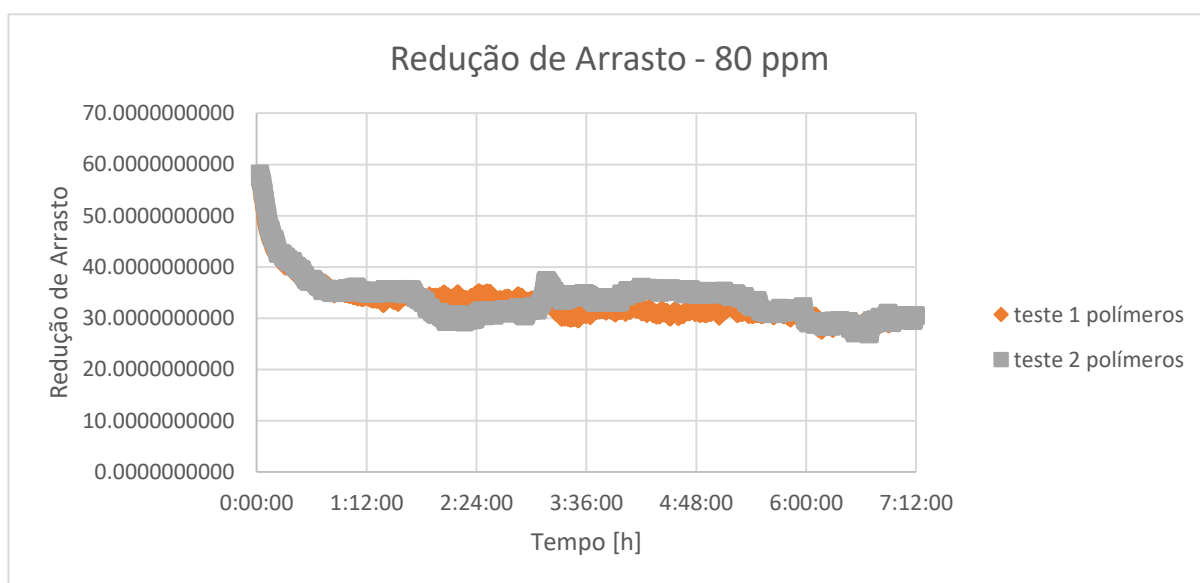


Gráfico 8: Redução de arrasto no tempo – 80 ppm

Analizando este gráfico, pode-se perceber como a redução de arrasto proporcionada pelo polímero se comporta no tempo. Na primeira hora de teste, tem-se uma redução bem alta, iniciando em aproximadamente 60% de redução, e cai quase que exponencialmente no tempo, resultando em uma grande redução de atrito inicial. Após aproximadamente duas horas de teste, vê-se a redução de arrasto se estabilizando em aproximadamente 30%, indicando que a turbulência do

escoamento, não mais é capaz de quebrar a cadeia polimérica, ou seja, o escoamento permanece com a redução de arrasto, por um longo tempo, que não foi possível determinar.

Para o teste de 40 ppm, decidiu-se diminuir o tempo de teste para três horas, visto que com os testes anteriores, percebeu-se que não seria necessário rodar por mais de três horas já que a redução de atrito se encontrou aproximadamente constante a partir deste tempo.

Os mesmos passos foram realizados novamente, para garantir a repetibilidade dos testes, além de definir os pontos de coleta das amostras. Então dois novos testes, de três horas cada, foram realizados e plotados. Os resultados encontram-se abaixo.

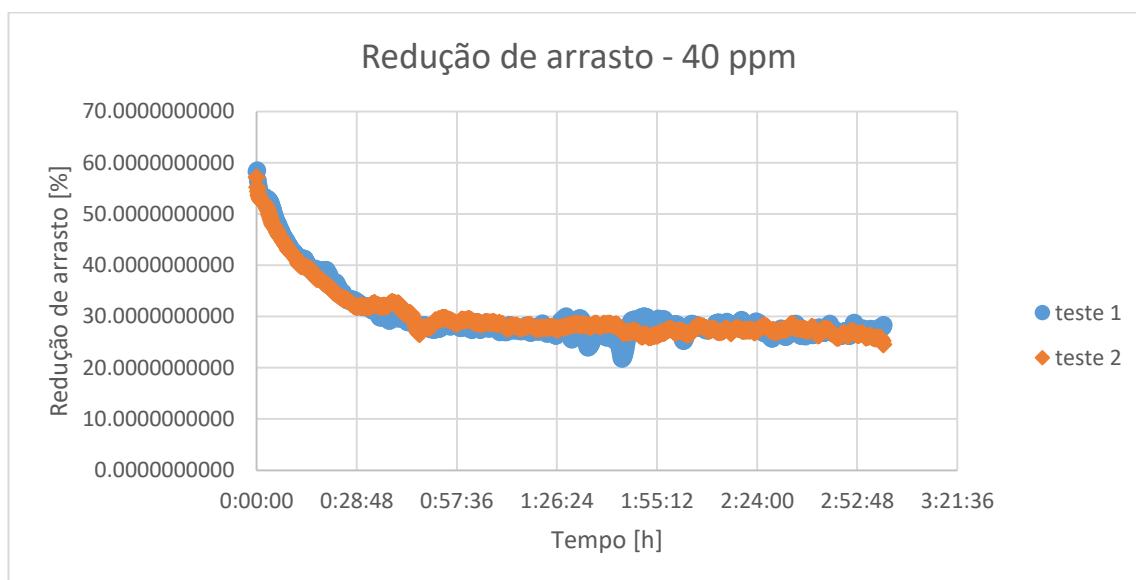


Gráfico 9: Redução de arrasto no tempo – 40 ppm

Analisando o gráfico pode-se garantir a repetibilidade dos dados, assim como no caso anterior para 80 ppm. Além disso, vê-se um comportamento bem similar à solução de 80 ppm, proporcionando na primeira hora de testes uma grande redução no atrito do escoamento, um pouco inferior a 60%, e após aproximadamente uma hora de testes, a redução se mantendo constante logo abaixo de 30%.

Para uma melhor visualização das diferenças entre as duas concentrações, de 80 ppm e 40 ppm, plotou-se ambos os quatro testes em uma mesma janela, apenas para fins de melhor entendimento e visualização.

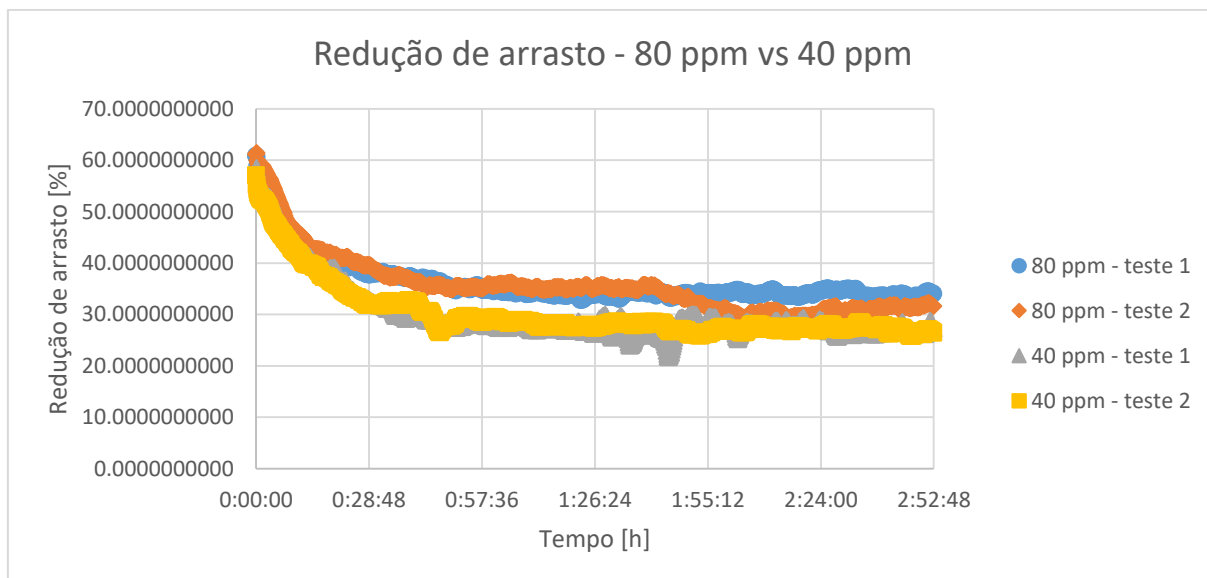


Gráfico 10: Redução de arrasto no tempo - 80 ppm vs. 40 ppm

Esta análise mostra como a concentração de 80 ppm, fornece uma maior redução de atrito, quando comparada à de 40 ppm. Fica clara a diferença, principalmente em uma hora de teste, e após ocorrer a estabilização da redução, quando a maior concentração fica acima da menor, indicando maior redução no arrasto.

## 5.2. Resultados experimentais em comparação com a assíntota de Virk

As medições experimentais dos coeficientes de atrito obtidos ao longo do tempo, permitem que os dados sejam comparados com as correlações de White, Prandtl-von Kármán e com a assíntota de Virk. Isso foi feito e os resultados são apresentados na Figura a seguir.

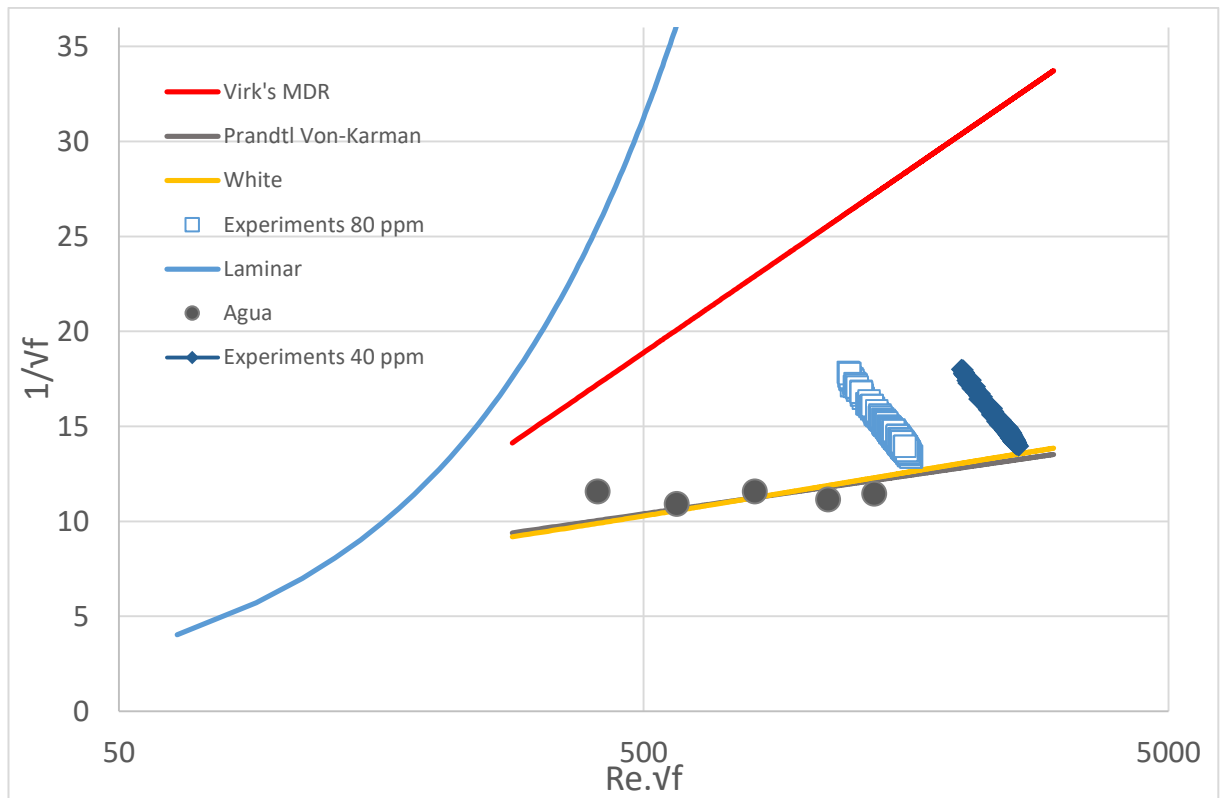


Gráfico 11: Assíntota de Virk

Pelo gráfico pode-se analisar que a solução de 80 ppm ainda se encontra longe da assíntota de Virk, e consequentemente, longe da redução máxima de atrito. Com isto, é possível ainda obter uma maior redução de atrito se aumentada a concentração. Além disso, é importante notar, que a solução de 40 ppm encontra-se mais à direita se comparada à solução de 80 ppm, isto ocorre, pois as soluções possuem viscosidades dinâmicas diferentes, como mostrado na seção 4.3, então como para uma menor concentração, a viscosidade é menor, o Reynolds é maior. Em todos os casos, os pontos experimentais mais superiores, correspondem aos coeficientes de atrito medidos no início dos testes. A medida que o tempo de residência da solução aumenta, os resultados vão tendendo para aqueles esperados de acordo com as correlações de Prandtl-von Karman e White, para escoamentos sem polímeros.

### 5.3. Tempos de relaxação

Para este teste, foram analisados os gráficos obtidos da redução de arrasto e com isso, definidos os pontos no tempo, para cada concentração, em que seriam retiradas amostras das soluções, para serem submetidas à análise no viscosímetro extensional. Abaixo encontra-se a tabela com os dados medidos no viscosímetro.

Tempo da amostra [min]	Tempo de relaxação [s]		
	80 ppm	40 ppm	água
t = 0	0.007848	0.003805	0.003028
t = 10	0.005976	0.005915	0.003028
t = 25	0.004358	0.005905	0.003028
t = 50	0.002809	0.005542	0.003028
t = 100	0.002823	0.007478	0.003028
t = 140	0.002773	0.005620	0.003028

Com isso, plotou-se o gráfico do tempo de relaxação pelos tempos em que as amostras foram coletadas.

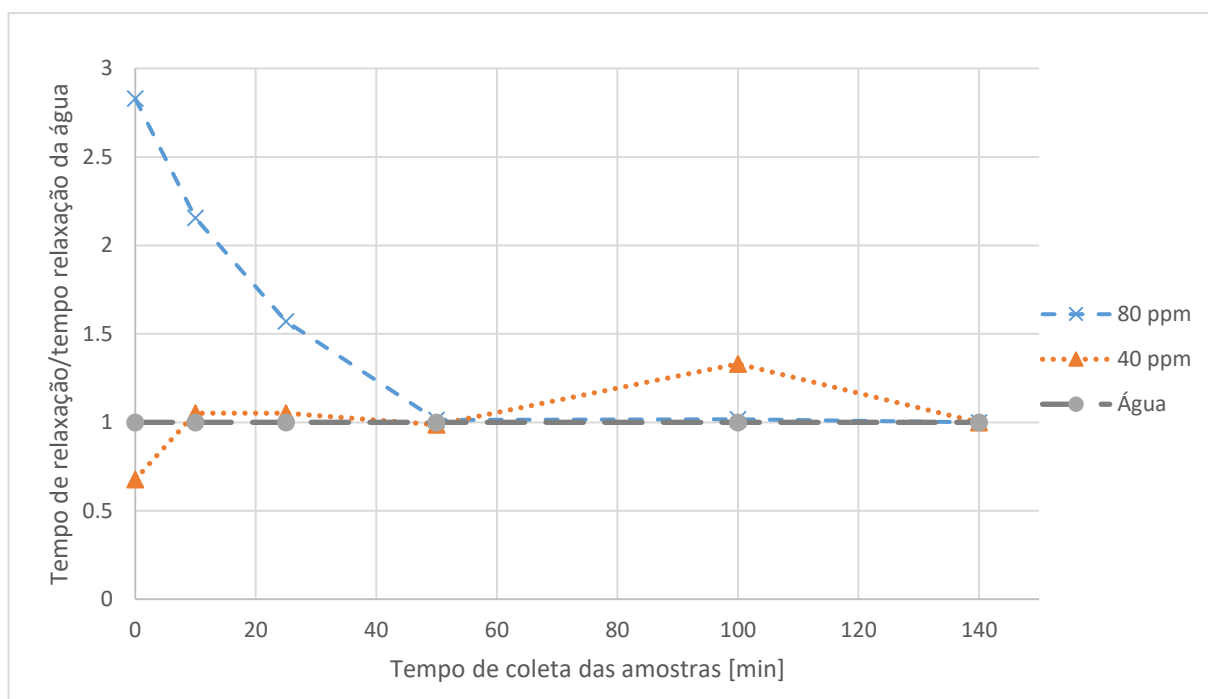


Gráfico 12: Tempos de relaxação vs. Tempos das amostras

Pode-se perceber, que para as amostras de 80 ppm, os tempos de relaxação parecem ter um comportamento que decai com o aumento do tempo em que são submetidas ao escoamento turbulento, se aproximando do tempo de relaxação da



água. Esta tendência, parece ter relação com o gráfico de redução de arrasto, visto que seu decaimento lembra a curva anterior, podendo indicar que quanto maior é a exposição do polímero ao escoamento turbulento, menor é o seu tempo de relaxação. Já para as amostras de 40 ppm, estas parecem ter o resultado em torno do tempo de relaxação da água, mostrando um baixo tempo de relaxação.

## 6 Conclusão

A redução de atrito é de extrema importância para a indústria e com os polímeros pode-se atingir grandes objetivos com relação a este tema. Neste presente relatório foi possível estudar melhor estas relações e influências que os polímeros possuem em um escoamento turbulento, para diferentes concentrações.

Também foi possível analisar a redução de arrasto proporcionada pelos polímeros em um escoamento turbulento, bem como sua degradação ao longo do tempo, que se estabiliza em um valor após algumas horas de testes, em que varia dependendo da sua concentração. Esta curva de redução de atrito pôde ser comparada à curva com os tempos de relaxação do mesmo, e percebida certa tendência de comportamento, podendo indicar que, quanto maior o tempo submetido ao escoamento turbulento, menor o tempo de relaxação da cadeia polimérica.

É importante também frisar, a importância de realizar testes periódicos com água para atestar que o aparato permaneça o mesmo do início dos testes. Além disso, manter o motor lubrificado e resfriado, são boas práticas para obter bons resultados.

Desta forma, apesar deste tópico vir sendo estudado há anos, ainda são necessários maiores estudos e esforços para compreender mais a fundo os benefícios trazidos pelos polímeros no que diz respeito à redução de atrito.

## 7 Referências Bibliográficas

WHITE, C. M.; MUNGAL, M. G. Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives. **Annual Revision of Fluid Mechanics**. 2008

KOSTIC, M. The ultimate asymptotes and possible causes of friction drag and heat transfer reduction phenomena. **Journal of Energy, Heat and Mass Transfer**. 1994. Vol. 16, 01-14.

LUMLEY, J. L. Drag Reduction by Additives. Department of Aerospace Engineering, Pennsylvania State University. **Annu. Rev. Fluid Mech.** 1969. 1:367-384.

VIRK, P. S. Drag reduction fundamentals. **AIChE Journal**. 1975

BURGER, E. D; MUNK, W. R.; WAHL, H. A. **Journal of Petroleum Technology**. 1982

DE ANDRADE, R. M. **Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico, Dissertação para Pós-graduação**. 2013

SOARES, E. J.; SANDOVAL, G. A. B.; SILVEIRA, L.; PEREIRA, A. S.; TREVELIN, R.; FABRICIO, T. **Physics of Fluids**. 2015

DE SOUZA, J. F. A.; DE OLIVEIRA, L. R.; DE AZEVEDO, J. L. L.; SOARES, I. D.; MATA, M. M. **Revista Brasileira de Geofísica**. 2011

URDAHL, O.; FREDHEIM, A. O.; LOKEN, K.; **Viscosity measurements of water-in-crude-oil emulsions under flowing conditions: A theoretical and practical approach**. 1996

VÁSQUEZ, J. D. H. **Estudo experimental da influência de redutores de atrito nas estruturas do escoamento turbulento**. Dept. de Engenharia Mecânica, PUC-Rio. 2015

TEIXEIRA, T. C. **Desenvolvimento de uma Bancada para ensaios com polímeros redutores de atrito**. Dept. de Engenharia Mecânica, PUC-Rio. 2017

BAYODE, E. OWOLABI; DAVID, J. C. DENNIS; ROBERT J. POOLE. Turbulent drag reduction by polymer additives in parallel-shear flows. **School of Engineering, University of Liverpool L69 3GH, UK**. 2017.