Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Rafaela Yvonne Rogerio de Medeiros

# Estudo Experimental Sobre A Degradação De Polímero Redutor De Atrito Em Escoamentos Turbulentos Em Dutos

Projeto de Graduação apresentado como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica pelo Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Luis Fernando Azevedo
Coorientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Julho de 2024

À minha querida mãe, Yvonne, que agora descansa em paz. Sua força, amor incondicional e sabedoria sempre foram minha maior inspiração. Você me ensinou o valor da perseverança e da resiliência, e mostrou-me que, mesmo nos momentos mais difíceis, é possível encontrar a coragem para seguir em frente. Este trabalho é dedicado a você, que sempre acreditou em meus sonhos e incentivou minha jornada acadêmica. Sua memória vive em cada conquista minha e este TCC é uma homenagem à sua vida, ao seu amor e ao seu legado.

Com eterna saudade e gratidão,

Rafaela.

## Agradecimentos

Primeiramente, expresso minha mais profunda gratidão a Deus, por me sustentar até este momento. Sem Sua orientação e providência ao abrir portas e colocar as pessoas certas em meu caminho, eu não teria superado as adversidades e alcançado este êxito.

À minha mãe (in memoriam), dedico meu mais sincero reconhecimento. Embora não tenha estado presente durante minha graduação, seu mérito é imenso. Ela foi a primeira a acreditar em meu potencial, trabalhando incansavelmente para investir em minha educação e fornecendo-me todas as ferramentas necessárias para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Ao meu pai, expresso minha gratidão pelo apoio oferecido dentro de suas possibilidades, que foi essencial para meu progresso.

À minha irmã, agradeço por sua constante motivação. Sempre que eu me sentia desanimada, suas palavras de incentivo me reerguiam e me lembravam de minha capacidade. Agradeço também ao meu irmão, por sempre acreditar que eu seria capaz de alcançar grandes realizações.

Aos meus amigos, especialmente Matheus Blois, Matheus Monnerat, Joshua Marquez, Gabriel Mello, Nathan Cunha, Karina Porto, Natan Fonseca e Vitor Hugo, registro meu agradecimento pelo apoio incondicional. Cada um, à sua maneira, contribuiu significativamente para esta conquista.

Agradeço ao Márcio, da oficina da PUC, cuja prontidão, eficiência e boa vontade na fabricação das peças para o experimento foram inestimáveis. Sua dedicação, ciente da importância do projeto para mim, assegurou a qualidade do projeto.

Agradeço à Petrobrás pelo financiamento que viabilizou este projeto de redução de atrito, incluindo a construção da Roda.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus orientadores pelo suporte integral durante o desenvolvimento do projeto. Sua vasta expertise foi crucial, mas foi sobretudo sua habilidade em extrair o melhor de mim, ajudando-me a manejar a ansiedade, as inseguranças e os prazos, que tornou possível a realização deste trabalho.

A todos, meu mais profundo e sincero agradecimento.

# Resumo

DE MEDEIROS, Rafaela Yvonne Rogerio. **Estudo experimental sobre a degradação de polímero redutor de atrito em escoamentos turbulentos em dutos**. Rio de Janeiro, 2024. 45 páginas. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O escoamento de líquidos em dutos é crucial para a indústria, agricultura, abastecimento de água e saneamento. Em dutos longos, a perda por atrito com a parede é a principal causa da queda de pressão e do aumento do consumo de energia. A adição de polímeros de cadeia longa para reduzir o atrito em escoamentos monofásicos é conhecida desde 1948 pelo trabalho de Tom [1]. A redução do atrito por adição de polímeros em escoamentos bifásicos é, contudo, menos explorada na literatura. Este trabalho visa contribuir para o entendimento dos efeitos da injeção de polímeros redutores de atrito em escoamentos bifásicos gás-líquido. Faz parte de um estudo mais amplo que acopla informações sobre a redução de atrito na fase líquida a uma metodologia para prever a redução de atrito em escoamentos bifásicos gás-líquido. O trabalho realizado teve como foco a avaliação do desempenho de um polímero redutor de atrito usado pela indústria de óleo e gás, o poli-isobuteno. O estudo avaliou o potencial de redução de atrito na fase líquida do polímero e sua degradação por cisalhamento contínuo e turbulência. Os testes foram realizados em uma bancada de testes existente no laboratório. A configuração inovadora dessa bancada consiste em um tubo circular girante, que fornece resultados equivalentes aos de bancadas convencionais, utilizando quantidades menores de produtos e sem a necessidade de bombas para manter o fluido em movimento, minimizando a degradação do polímero. Os resultados de qualificação mostraram o bom desempenho da bancada projetada. Os testes com o polímero com concentrações de 100, 200 e 300 ppm apresentaram reduções de atrito iniciais da ordem de 20%, 65% decaindo e 80%. Estes resultados apontam para a viabilidade do uso do produto em escoamentos bifásicos. No entanto, estudos adicionais de longa duração são recomendados para a avaliação da degradação do produto.

## Palavras-chave

Redução de atrito; Escoamento em dutos, Adição de polímeros; Degradação; Escoamentos turbulentos.

# Abstract

DE MEDEIROS, Rafaela Yvonne Rogerio. **Experimental Study on the Degradation of Friction-Reducing Polymers in Turbulent Flow in Pipelines**. Rio de Janeiro, 2024. 45 pages. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Liquid flow through pipelines is of great relevance to industry, agriculture, water supply and sewage systems. In the case of long pipelines, wall friction is responsible for nearly the totality of the pressure drop and, consequently, the energy consumption required to transport the fluids. Drag reduction by the addition of long-chain polymers to single phase liquid flow has been known since 1948 after the work of Tom [1]. Drag reduction by polymer addition in gas-liquid two phase flow is, however, less explored in the literature. The main objective of the present work is to contribute to the understanding of the effects of injecting drag reducing polymers in two-phase gas-liquid flow. This work is part of a broader study where information on single phase drag reduction is used in a methodology to predict drag reduction in two-phase gas-liquid flows. The focus of the present work was on the analysis of the performance of a commercial drag reduction agent used by the oil/gas industry, the poly-isobuthene. The study was directed to the assessment of the drag reduction potential of the polymer , and its degradation by the continued shear against the wall and turbulence. The tests were conducted using an innovative test section configuration available in the laboratory. This test section is formed by a rotating wheel that yields results equivalent to those obtained from conventional long loops that use large quantities of product and require pumps to maintain the flow promoting additional polymer degradation. The test section was modified to allow the use a more accessible torque meter, but of similar uncertainty as the original sensor. The preliminary qualification results demonstrated the good performance of the designed test section. The tests with poly-isobuthene polymer with concentrations of 100, 200 and 300 ppm presented levels of drag reduction of the order of 20%, 65% and 80%. These results point to the viability of the use of the product in two-phase flows. However, additional long-duration tests are recommended to fully assess the product degradation.

## Keywords

Friction reduction; Pipeline flow; Addition of polymers; Degradation; Turbulent flows.

## Sumário

1. Introdução ..... 11

2. Revisão da Literatura ..... 13

3. Método Experimental ..... 23
3.1. Aparato Roda: princípio de funcionamento ..... 23
3.2. Aparato Roda: novo projeto ..... 26
3.3. Procedimento Experimental ..... 30
3.3.1. Calibração estática do medidor de torque ..... 30
3.3.2. Calibração dinâmica da roda ..... 31
3.3.3. Preparação das amostras ..... 33
3.3.4. Testes com fluidos ..... 33

4. Resultados ..... 35
4.1. Testes de validação da Roda ..... 35
4.2. Resultados para fluido com redutor de atrito ..... 38

5. Conclusão ..... 40

6. Referências ..... 42

## Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes ..... 15
Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda ..... 17
Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito ..... 18
Figura 4: Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede ..... 20
Figura 5: Redução de arrasto em função do tempo ..... 21
Figuras 6: Vista esquemática da seção de testes construída em 2018 .... 24
Figuras 7: Vista esquemática descrevendo o princípio de funcionamento da roda para medição do atrito do fluido com o tubo. ..... 25
Figura 8: Aparato experimental atual ..... 28
Figura 9: Vista superior do aparato experimental ..... 28
Figura 10: Fotografia do experimento atual ..... 29
Figura 11: Fotografia da vista de cima do experimento atual ..... 29
Figura 12: Calibração estática do medidor de torque com massas fixadas à roda ..... 30
Figura 13: Resultado da curva de calibração Torque versus tensão realizada em 15/06 ..... 31
Figura 14: Resultados da calibração dinâmica da roda no dia 15/06 ..... 32
Figura 15: Relação Torque x Velocidade para o C12 puro. ..... 36
Figura 16: Resultados do teste de validação em 15/06 da roda operando apenas com ar, com C12 e a diferença entre ambos ..... 37
Figura 17: Resultados da variação de torque com o tempo para diferentes concentrações ..... 38
Figura 18: Resultados da variação do coeficiente de atrito de Fanning com o tempo para diferentes concentrações ..... 39

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Média da calibração dinâmica da roda em vazio ..... 32
Tabela 2: Resultados dos testes de validação da roda operando com C12 ..... 36
Tabela 3: Resultados dos testes de validação da roda operando com C12 ..... 37

"A força não vem da capacidade física, vem de uma vontade indomável.",

Mahatma Gandhi

# 1.
# Introdução

Escoamento de líquidos através de dutos está presente em muitas aplicações de interesse para a indústria, agricultura, abastecimento de água e saneamento. Em dutos longos para o transporte de líquidos, o atrito entre o fluido e a parede do duto é responsável por quase a totalidade da queda de pressão, consequentemente, pela energia despendida no bombeamento. A redução de atrito no escoamento em dutos é, portanto, tema de grande interesse que vem sendo estudado há muitos anos.

Há várias alternativas em estudo para a redução de atrito no escoamento em dutos. Algumas linhas de pesquisa buscam desenvolver configurações da superfície dos tubos que interajam com a estrutura do escoamento turbulento junto a parede reduzindo o atrito. Outras linhas de pesquisa têm como foco a adição de substâncias ao fluido em escoamento de modo a também alterar a dinâmica do escoamento, reduzindo o atrito (Sellin & Ollis, 1980 [2]; Khalil et al., 2002 [3]).

Em 1948, Toms verificou que a adição de pequenas quantidades de polímeros com longas cadeias moleculares a um escoamento turbulento produzia significativas reduções no atrito [1]. Um marco na indústria de óleo e gás foi a utilização em 1979 de polímeros redutores de atrito no oleoduto TransAlasca [4]. Nesta aplicação, o polímero Conoco CDR evidenciou sua capacidade de diminuir o atrito, resultando em um aumento significativo na vazão, estimado em cerca de 200.000 barris por dia (ou 1.325 $m^3/h$). Atualmente, os desafios concentram-se na identificação dos tipos de polímeros mais adequados para cada uso específico e na determinação das concentrações ideais desses polímeros.

Apesar de ainda haver discussões na comunidade acadêmica sobre os mecanismos responsáveis pela redução de atrito por adição de polímeros a escoamentos turbulentos monofásicos, as aplicações de sucesso na indústria estão comprovadas e cada vez mais utilizadas.

Os resultados de estudos e aplicações industriais indicam que quanto maior o peso molecular do polímero utilizado, maior a redução de atrito obtida no escoamento. No entanto, a constituição molecular dos polímeros apresenta desafios, pois estes se degradam ao longo das tubulações (Edson J. Soares et al., 2015 [5]). Quando a cadeia polimérica se quebra, o efeito de redução de atrito é diminuído ou

cessa. Essa degradação é particularmente intensificada quando o fluido escoa através de bombas, válvulas, restrições ou curvas acentuadas como joelhos e T's.

Um estudo também de grande interesse, porém mais complexo, está ligado ao desempenho da adição de polímeros redutores de atrito a escoamentos bifásicos gás-líquido. Este é um tema de grande interesse para a indústria de óleo e gás devido ao fato que várias linhas de produção de petróleo operam com óleo e gás escoando simultaneamente. O aumento de produção, ou diminuição de níveis de pressão, que podem ser obtidos pela injeção de polímeros são potencialmente significativos. No entanto, ainda não é bem compreendida a atuação dos polímeros na fase líquida e sua influência nas mudanças de regime de escoamento bifásico.

O presente trabalho tem como objetivo principal contribuir para o entendimento dos efeitos da injeção de polímero redutor de atrito em escoamento bifásico gás-líquido. O trabalho realizado teve como foco a avaliação do desempenho de um polímero redutor de atrito usado pela indústria de óleo e gás. Foram analisados os efeitos de redução de atrito obtidos na fase líquida, assim como a degradação do polímero. Os testes foram realizados em uma bancada de testes com uma configuração inovadora formada por um tubo na forma de um círculo girante, que fornece resultados equivalentes àqueles obtidos em bancadas convencionais na forma de longos loops que utilizam quantidades de produtos muito maiores e necessitam de bombas para manter o fluido em movimento promovendo degradação do polímero.

Este estudo, direcionado para os efeitos do redutor de atrito na fase líquida, se relaciona a um estudo maior para a previsão do desempenho de redutores de atrito em escoamentos bifásico gás-líquido. As informações produzidas sobre a redução de atrito e degradação no escoamento monofásico de líquido são introduzidas em simuladores de escoamentos bifásicos produzindo estimativas sobre as reduções de atrito a serem obtidas no escoamento bifásico.

O trabalho descrito a seguir está dividido em 5 capítulos. Após a motivação para o trabalho apresentada no capítulo 1, uma breve revisão da literatura é apresentada no capítulo 2. O capítulo 3 descreve a seção de testes e os procedimentos utilizados nos experimentos conduzidos. Os resultados do trabalho são mostrados e discutidos no capítulo 4, sendo as principais conclusões obtidas sintetizadas no capítulo 5.

# 2.
# Revisão da Literatura

A redução de atrito através de polímeros é um fenômeno que ocorre quando pequenas quantidades de polímeros são adicionadas a um fluido, resultando em uma diminuição significativa na resistência ao escoamento. Este efeito foi primeiramente observado por Toms em 1948 [1]. Desde então, numerosos estudos têm explorado os mecanismos subjacentes a este fenômeno e a eficácia de diferentes polímeros em diversas condições operacionais.

Os polímeros atuam na redução do atrito através de vários mecanismos. A principal teoria sugere que os polímeros alteram a estrutura do fluido próximo à parede do duto, modificando a turbulência e a formação de vórtices. Esta alteração na dinâmica do fluido reduz a dissipação de energia e, consequentemente, diminui o atrito. Estudos experimentais e simulações numéricas têm demonstrado que a eficácia da redução de atrito depende de fatores como a concentração de polímeros, o peso molecular dos polímeros e as condições de escoamento (Reynolds et al., 2013 [6]).

De uma forma geral, podemos dizer que a teoria se divide basicamente em duas classes: uma baseada nos efeitos viscosos, defendida por Lumley em 1973 [7], e outra baseada nos efeitos elásticos, defendida por Tabor e De Gennes em 1986 [8].

Lumley aborda os efeitos viscosos com profundidade em seus trabalhos. Sua análise concentra-se em como a viscosidade influencia a dinâmica dos fluidos, impactando desde fluxos laminares até turbulentos. Ele enfatiza que os efeitos viscosos são cruciais na compreensão da resistência ao movimento em fluidos, uma vez que a viscosidade é responsável pela dissipação de energia cinética na forma de calor. Esse aumento de viscosidade provoca a supressão dos pequenos vórtices, diminuindo a turbulência e, consequentemente, reduzindo o arrasto do fluido. Portanto, esse efeito de redução seria observado em todos os níveis de concentração, mesmo os mais baixos.

Seguindo uma linha de pensamento semelhante, Oldroyd em 1949 [9] fez sua contribuição baseada na informação de que a redução de atrito se deve a um aumento da viscosidade efetiva em regiões de alta turbulência. Kostic em 1994 [10] demonstrou que a adição de polímeros redutores de atrito em um fluido turbulento

pode resultar em uma significativa redução do atrito na superfície das paredes do conduto, além de afirmar que gera a laminarização do escoamento turbulento, alongando os vórtices presentes e diminuindo o fluxo não linear. Ele sugeriu que o mecanismo pelo qual os polímeros induzem a laminarização envolve a elasticidade dos polímeros, que interage com as flutuações turbulentas de tal forma que reduz a formação de vórtices e estruturas turbulentas. Os polímeros se estendem e relaxam em resposta às tensões de cisalhamento, amortecendo as flutuações turbulentas e estabilizando o escoamento. Isso significa que, embora as instabilidades de grande escala ainda estejam presentes no escoamento, as de pequena escala, que têm um impacto mais significativo, podem ser praticamente eliminadas. Subsequentemente, corroborando o trabalho de Kostic, Sureshkumar e Beris em 1996 [11] e Kawaguchi em 2002 [12] demonstraram, através de visualizações experimentais e simulações numéricas, que a adição de polímeros à solução reduz as flutuações de vorticidade nas regiões próximas às paredes da tubulação. Ptasinski et al. Em 2003 [13] também mostraram que as tensões poliméricas dissipam energia turbulenta.

Ainda dentro dessa linha de pensamento sobre os efeitos viscosos, Liberatore et al. Em 2004 [14] sugeriram que a redução de arrasto nem sempre está correlacionada com o peso molecular do polímero, embora reconheçam que a distribuição das moléculas do polímero pode ter um papel importante no fenômeno. O estudo sugeriu que outros fatores, como a estrutura do polímero, a concentração de polímeros, e a interação entre as moléculas de polímero e o fluido base, desempenham papéis cruciais na redução de arrasto. Por exemplo, a conformação do polímero em solução (se é mais estendido ou enrolado) pode influenciar significativamente sua eficácia na redução de arrasto. Além disso, Min et al. em 2004 [15], Ptasinski et al. em 2001 [16] e Warholic et al. em 1999 [17] 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, o que explica mais sobre os limitadores da redução de atrito dos polímeros.

Além disso, Fontaine et al. em 1992 [18] e McComb e Rabie em 1979 [19] destacam a importância da camada limite na dinâmica de redução de atrito em escoamentos turbulentos de fluidos poliméricos, onde a redução da intensidade da turbulência e a redistribuição da energia cinética resultam em uma diminuição

significativa do atrito. Isso significa que os efeitos mais distantes da camada limite não são tão expressivos quando comparados aos efeitos próximos às paredes.

Do outro lado, a teoria da cascata de Tabor e De Gennes [8] apresenta uma perspectiva diferente sobre o efeito dos polímeros no escoamento turbulento. Segundo essa teoria, o impacto dos polímeros é mais pronunciado nas pequenas escalas do escoamento turbulento, onde a tensão dos polímeros se compara aos tensores de Reynolds. Tabor e De Gennes argumentam que, em tais condições, os polímeros desempenham um papel crucial na inibição da formação de novos vórtices, fundamentais para a dissipação de energia cinética turbulenta, e esta inibição se deve ao aumento do módulo elástico da solução polimérica. Esse aumento é provocado pelo alongamento das moléculas de polímero, que, ao interferir na cascata de Kolmogorov, resulta em uma redução 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 significante diferença entre as duas teorias.

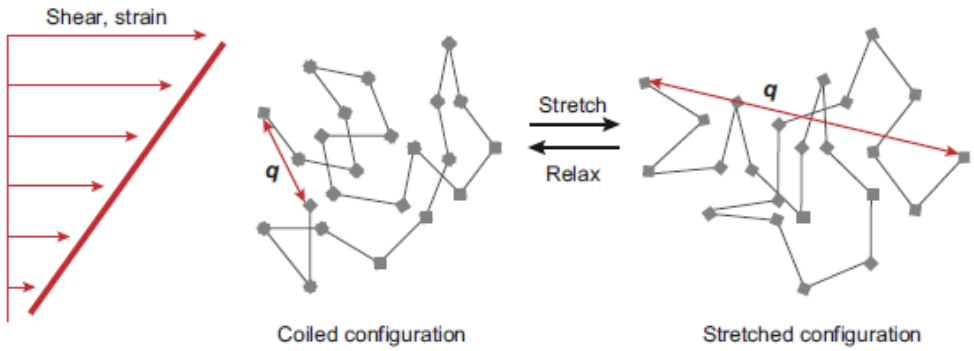



Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes

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 [8], Elperin et al. em 1967 [20] sugeriram que através da transferência de energia do escoamento para os polímeros e o subsequente alongamento das cadeias poliméricas, essa teoria

explica a modificação da estrutura turbulenta e a diminuição do atrito. Bushnell & Moore em 1991 [21] 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 [14]) foi dito que nem sempre o aumento do peso molecular leva ao aumento da redução de atrito.

Min et al. em 2003 [22] destacou a importância do tempo de relaxamento das moléculas de polímero na eficiência da redução de atrito em escoamentos turbulentos. Ao demonstrar que polímeros com tempos de relaxamento mais longos são mais eficazes na supressão de turbulência e redução de atrito. Esta relação diz 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. em 2005 [23] 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 quando interagem com regiões de altas tensões cisalhantes, isto é, próxima às paredes. A separação dos filamentos foi atribuída à interação complexa entre as forças elásticas dos polímeros e as forças inerciais do fluido turbulento. À medida que os polímeros são esticados pelas flutuações de velocidade, eles eventualmente se separam em filamentos mais finos devido às tensões alongadas. Além disso, a injeção de polímeros distribuída de forma heterogênea no escoamento pode ocasionar uma maior eficácia no fenômeno de redução de atrito.

A compreensão da turbulência é fundamental para explorar os efeitos dos polímeros na redução de atrito, especialmente em escoamentos altamente turbulentos onde os benefícios são mais pronunciados. Polímeros interagem com as estruturas turbulentas, suprimindo flutuações e vórtices, resultando em uma redução significativa do atrito. A otimização dos parâmetros dos polímeros e uma compreensão profunda da dinâmica da turbulência são essenciais para maximizar a eficácia desses aditivos em aplicações práticas.

Apesar de se saber quando a turbulência está ocorrendo, ainda é difícil prever com precisão o seu comportamento. A turbulência é um fenômeno complexo que se caracteriza por flutuações irregulares e aparentemente aleatórias nas variáveis de

um fluido, como velocidade, temperatura e outros escalares. Estas flutuações instantâneas tornam o estudo dos fenômenos de transporte, como o transporte de momentum, calor e massa, particularmente desafiador. A definição precisa de turbulência envolve o reconhecimento de que, na prática, apenas propriedades estatísticas dessas flutuações podem ser analisadas, já que as variáveis instantâneas exibem comportamento caótico.

Kolmogorov em 1941 [24] 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. A teoria descreve a transferência de energia cinética das escalas maiores (onde a energia é injetada) para as escalas menores (onde a energia é dissipada). Esta transferência ocorre através de uma cascata de vórtices de diferentes tamanhos, onde grandes estruturas turbulentas se fragmentam em vórtices menores, que por sua vez se dividem em vórtices ainda menores, até que a energia é finalmente dissipada pela viscosidade em escalas muito pequenas.

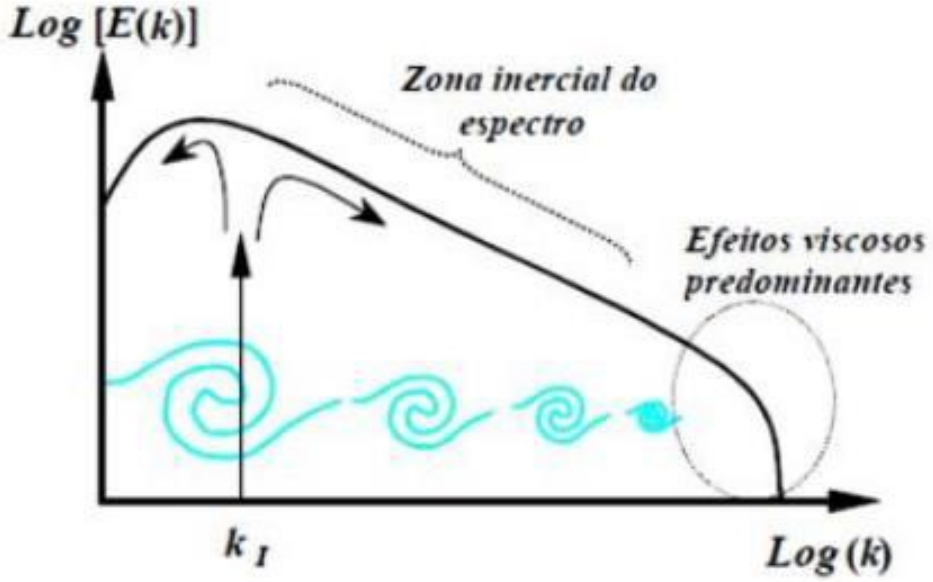



Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda

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 reenergizados pela transferência de momento dos grandes turbilhões.

A explicação fenomenológica de Virk em 1975 [25] para os mecanismos que limitam os valores máximos de redução de atrito em escoamentos turbulentos com adição de polímeros destaca a importância da expansão da camada intermediária na camada limite. A teoria sugere que a redução máxima de atrito é alcançada quando os polímeros influenciam todas as regiões do escoamento, especialmente a camada intermediária, resultando em uma modificação substancial na estrutura turbulenta e na distribuição de energia.

O gráfico Prandtl-Kármán é uma ferramenta poderosa para visualizar e entender a redução de atrito em escoamentos turbulentos com a adição de polímeros. A partir deste gráfico, é possível identificar o início da redução de atrito, observar o aumento da eficiência com a concentração de polímeros e determinar o ponto de saturação onde a redução de atrito atinge seu limite máximo, como pode ser confirmado na Figura 3.

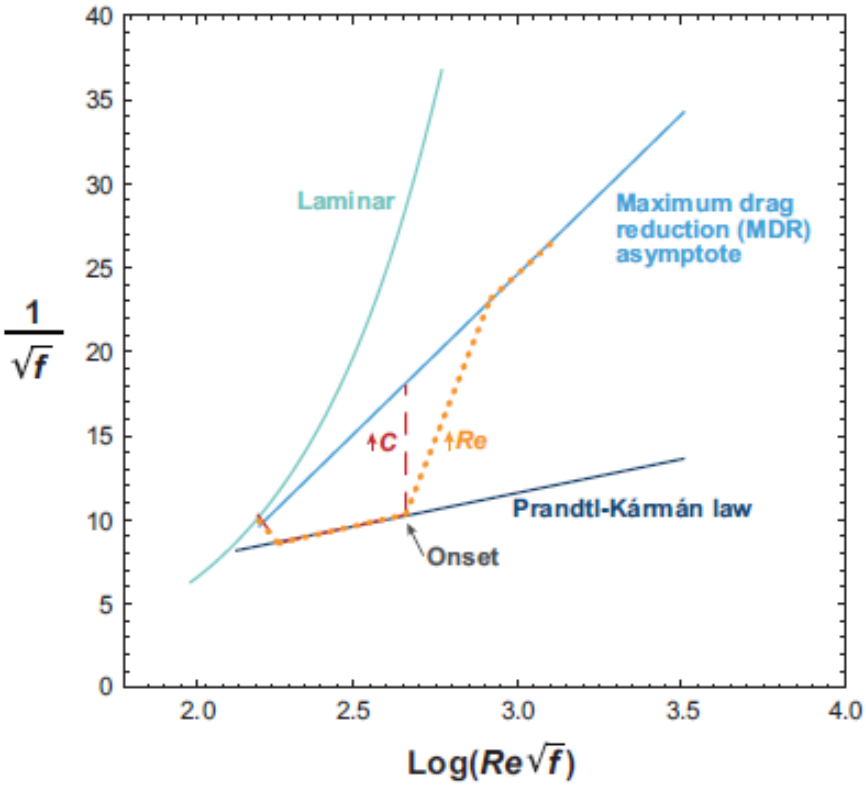



Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito

No gráfico da Figura 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 máxima redução de atrito é alcançada quando, para um número de Reynolds fixo, a adição de maiores quantidades de polímero não resulta em uma redução adicional significativa do arrasto. Este ponto de saturação é visualizado no gráfico Prandtl-von Kármán, onde a curva de redução de atrito se aproxima de uma assíntota.

Recentemente, Dubief et al. em 2004 [26] propuseram um modelo interessante para explicar como as moléculas de polímeros flexíveis interagem com escoamentos turbulentos. De acordo com os pesquisadores, as macromoléculas operam de maneira cíclica e organizada, absorvendo energia dos vórtices e posteriormente transferindo essa energia de volta para o escoamento. As moléculas são alongadas ao serem forçadas a girar em torno dos vórtices na região da subcamada de transição. Durante esse processo, o polímero se estende e capta as flutuações que causam os vórtices. Em seguida, a molécula é puxada para a subcamada viscosa, onde volta a se contrair e libera a energia acumulada para o escoamento na direção principal. Este fenômeno está representado na Figura 4.Esse ciclo se repete inúmeras vezes, facilitando a interação contínua entre as moléculas de polímero e a estrutura turbulenta do escoamento.

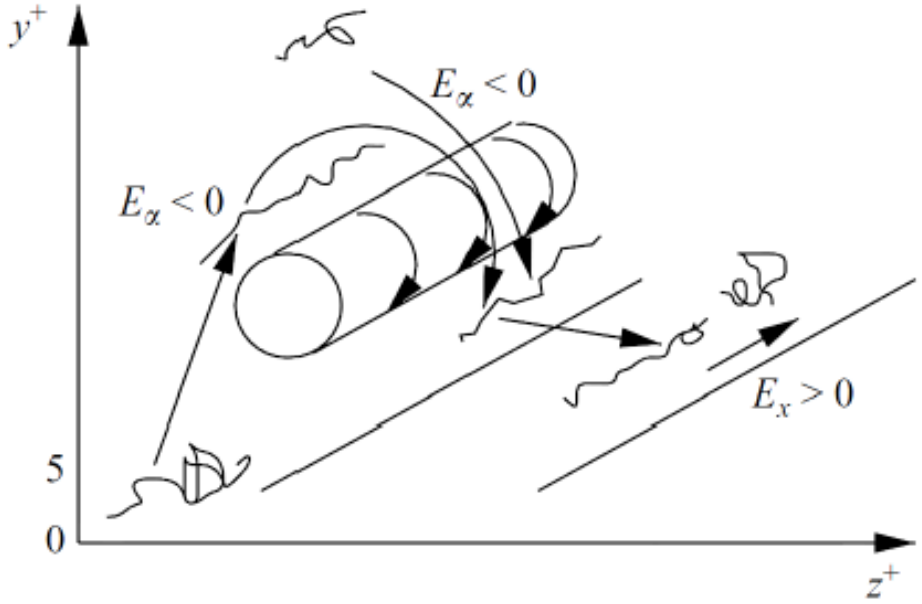



Figura 4: Interação das macromoléculas com os vórtices próximo à parede

A degradação dos polímeros em escoamentos turbulentos é um fenômeno importante a ser considerado, especialmente em aplicações industriais onde polímeros são adicionados para reduzir o atrito. O mecanismo de degradação refere-se à quebra das cadeias poliméricas devido às forças mecânicas e às condições adversas presentes no escoamento. Esse processo pode reduzir a eficácia dos polímeros na redução de atrito ao longo do tempo. Merril e Horn em 1984 [27], ao utilizar técnicas de cromatografia de permeação em gel (GPC - Gel Permeation Chromatography), investigaram o mecanismo de degradação de polímeros em escoamentos turbulentos. Suas descobertas revelaram que as cisões nas cadeias poliméricas tendem a ocorrer 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. em 2000 [28], Nakken et al. em 2001 [29], Vanapalli et al. em 2005 [30] e Pereira e Soares em 2012 [31] mostram que, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, após um longo período, a redução de arrasto tende a um regime permanente, a partir do qual nenhuma degradação adicional é observada.

Importantes resultados experimentais obtidos pela variação temporal na eficiência de soluções poliméricas para redução de arrasto em escoamentos turbulentos A figura 5, abaixo, ilustra este comportamento.

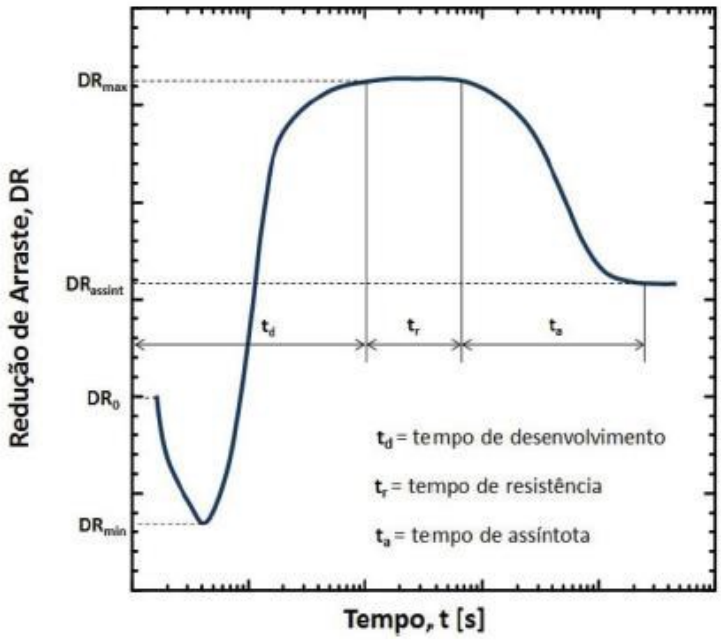



Figura 5: Redução de arrasto em função do tempo

Outro estudo muito importante para este trabalho está nos resultados sobre os estudos do coeficiente teórico de White em 1969 [32] e Ito em 1967 [33]. Estes são fundamentais na compreensão da dinâmica de fluidos em escoamentos turbulentos, especialmente no contexto da redução de arrasto por aditivos poliméricos. Ambos os pesquisadores utilizaram um aparato de roda para realizar seus testes, sendo o mesmo modelo que estamos utilizando, o que lhes permitiu analisar detalhadamente os efeitos das forças de cisalhamento e das condições de escoamento nas propriedades dos polímeros.

Esses estudos enfatizam a complexidade do fenômeno de redução de atrito através de aditivos poliméricos, ressaltando a importância de diversos fatores, como a distribuição molecular e as interações entre as tensões de Reynolds e as tensões flutuantes, na determinação da eficácia dos polímeros em diferentes condições de escoamento. Portanto, uma compreensão completa desse fenômeno exige uma análise detalhada e abrangente das características moleculares e dos comportamentos dinâmicos dos polímeros em ambientes turbulentos.

Diversos polímeros têm sido estudados para a redução de atrito em dutos circulares. Entre os mais comuns estão a poliacrilamida (PAM), polietileno óxido (PEO), e o poliisobutileno (PIB). Estes polímeros são escolhidos devido à sua alta solubilidade em água e à capacidade de formar soluções viscosas que são eficazes na redução da turbulência (Dimitropoulos et al., 2005 [34]).

Estudos experimentais têm sido fundamentais para entender a eficácia dos polímeros na redução de atrito. Por exemplo, trabalhos de Virk em 1975 [25] e Escudier et al. em 1999 [35] forneceram evidências detalhadas sobre a relação entre a concentração de polímeros e a redução de atrito. Além disso, aplicações práticas em oleodutos e gasodutos demonstraram que a adição de polímeros pode reduzir significativamente a pressão necessária para o transporte de fluidos, resultando em economias substanciais de energia (Sellin et al., 1982 [36]).

Apesar dos benefícios, a utilização de polímeros na redução de atrito enfrenta alguns desafios. A degradação dos polímeros devido a altas taxas de cisalhamento e interações químicas com o fluido pode limitar sua eficácia a longo prazo. Além disso, a recuperação e reciclagem dos polímeros representam desafios ambientais e econômicos que precisam ser considerados (White & Mungal, 2008 [37]).

# 3.
# Método Experimental

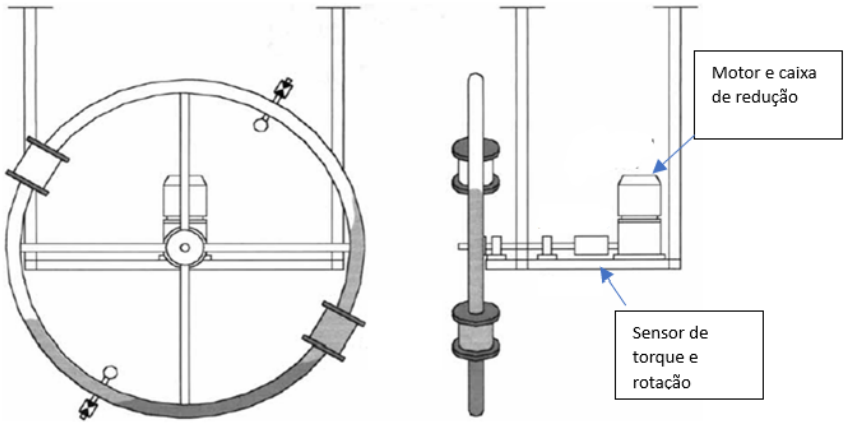
No presente trabalho, o estudo sobre a redução do atrito promovida pela adição de polímero ao fluido foi conduzido utilizando uma seção de testes formada por um tubo na forma de um loop fechado circular. Este dispositivo, denominado a Roda, foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Fluidos da PUC-Rio em 2018 por um aluno como parte de um projeto de pesquisa apoiado pelo CENPES/Petrobras. Um pedido de patente foi depositado para proteger este desenvolvimento.

A principal vantagem na utilização da Roda no estudo de redutores de atrito está na pequena quantidade de produto necessária para os testes. Nos testes convencionais o fluido de trabalho contendo o aditivo redutor de atrito é forçado a escoar por dutos longos em forma de loop, exigindo quantidade significativas de fluido de trabalho e aditivo. Normalmente bombas hidráulicas são utilizadas para deslocar o fluido de trabalho, acelerando o processo de degradação dos aditivos redutores de atrito. O dispositivo da Roda não utiliza bombas, o que permite o estudo da degradação somente devido à interação do fluido com a parede do tubo.

A seguir são apresentadas as descrições da seção de testes disponível no LEF e as modificações que foram introduzidas como parte do presente trabalho.

## 3.1.
## Aparato Roda: princípio de funcionamento

A bancada experimental foi construída a partir de cinco tubos de acrílico, com um diâmetro interno de 26 milímetros, curvados na forma de arcos de círculo e conectados em suas extremidades por luvas. Após conectados, os arcos formam um círculo com diâmetro de 750 mm. Para suportar a tubulação, foi desenvolvido um arranjo utilizando duas peças centrais de alumínio acopladas e cinco hastes radiais de alumínio fixadas a essas peças centrais. Cada haste possui uma haste menor interna que permite ajustar seu comprimento para melhor alinhamento radial da tubulação.




Figuras 6: Vista esquemática da seção de testes construída em 2018

Um motor elétrico de corrente contínua de 24 V foi instalado para fornecer o torque necessário à roda, permitindo controlar a velocidade de rotação do aro e, consequentemente, a velocidade de escoamento. O motor é acoplado a uma caixa de redução formada por coroa e pinhão. Este tipo de motor é utilizado para acionar limpadores de para-brisas de caminhões, sendo bastante robusto e confiável.

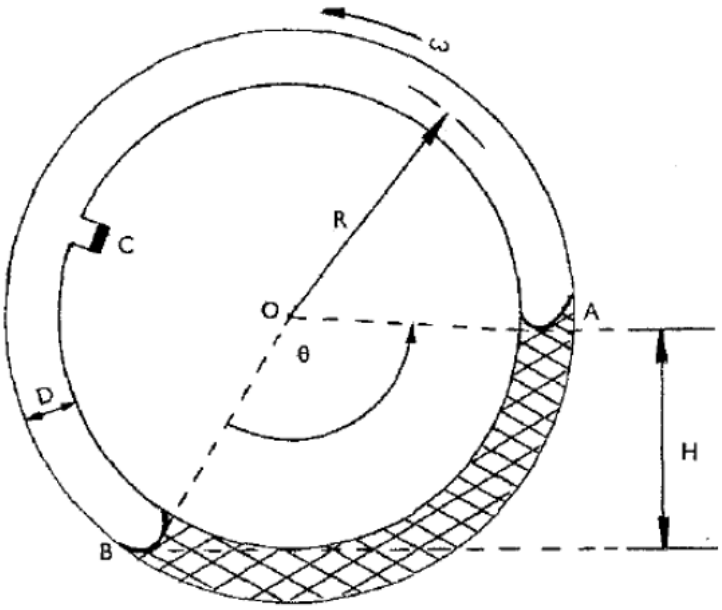
O eixo horizontal ligando a roda à caixa de redução do motor é apoiado em mancais de rolamento montados em bases que permitem um perfeito alinhamento do conjunto. Acoplamentos flexíveis foram utilizados para facilitar a delicada operação de alinhamento dos eixos.

Acoplado ao eixo e posicionado entre a caixa de redução e a roda, foi instalado um sensor de torque da Omega modelo TQ513-030-EN1024. Este sensor também mede a rotação do eixo através de um *encoder*.

A operação da roda exigia a manutenção de velocidade de rotação constante durante os testes. Para isso foi projetado e construído um controlador em malha fechada baseado na arquitetura Arduino. Sistemas de amplificação de sinais de baixo ruído operados com baterias foram implementados para possibilitar o controle da velocidade da roda.

A estabilidade do aparato é crucial para assegurar que nenhuma vibração causada por excentricidades ou desbalanceamentos afete o comportamento do escoamento e os resultados do experimento. Para garantir essa estabilidade, foi montada uma estrutura cúbica utilizando perfis do tipo Bosch®, onde a roda foi fixada em uma das arestas superiores.

A Figura 7 traz uma representação esquemática para auxiliar no entendimento do funcionamento da Roda. Um tubo com diâmetro D é dobrado de modo a formar um círculo de raio R. O círculo gira em torno de um eixo central horizontal com velocidade angular ω acionado por um motor elétrico. O fluido a ser testado é inserido através da porta C, ocupando a região hachurada da figura. A rotação da roda estabelece um desnível entre as superfícies livres representado por H. O torque no eixo motor pode ser medido por um taquímetro, representando o torque produzido pela tensão cisalhante que o fluido exerce sobre a parede do tubo.




Figuras 7: Vista esquemática descrevendo o princípio de funcionamento da roda para medição do atrito do fluido com o tubo.

White and Bond em 1971 [38] propuseram o dispositivo da Roda mostrado na figura acima para medir a viscosidade de fluidos. Neste trabalho o coeficiente de atrito de Fanning foi definido como,

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2} \qquad \text{eq. (3.1)}$$

onde $\tau_w$ é a tensão cisalhante na parede, ρ é a massa específica do fluido e $\bar{u}$ é a velocidade média do tubo. O coeficiente de Fanning pode ser relacionado com as informações da roda pela equação 3.2,

$$C_f = \frac{DHg}{2\theta R^3 \omega^2} \qquad \text{eq. (3.2)}$$

onde, g é a aceleração da gravidade e os demais parâmetros estão definidos na Figura 3.1.

Caso o torque seja medido diretamente, como no presente trabalho, não é necessário medir-se a altura H. O coeficiente de Fanning pode ser obtido diretamente pela expressão,

$$C_f = \frac{TD}{2\rho\omega^2 R^3 V} \qquad \text{eq. (3.3)}$$

Onde, T é o torque medido na roda, R é o raio da roda e V o volume de líquido colocado dentro da roda.

É importante ressaltar que o coeficiente de atrito de Fanning é quatro vezes o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, *f,* definido por,

$$f = \frac{2\Delta p D}{\rho L \bar{u}^2} \qquad \text{eq. (3.4)}$$

onde, Δp é a queda de pressão no tubo de comprimento *L* e diâmetro *D.*

Em 2018, foi projetada no laboratório de fluidos da PUC-Rio a seção de testes da roda, apresentada esquematicamente na Figura 7.

## 3.2.
## Aparato Roda: novo projeto

O bom desempenho da Roda montada foi confirmado por vários testes realizados ao longo do projeto dedicado ao estudo de redutores de atrito conduzido em parceria com a Petrobras. Infelizmente, o sensor de torque e rotação da Omega utilizado no projeto original apresentou problemas na medição do torque. Como não houve possibilidade de reparo e o sensor tem custo elevado em torno de US$ 6000, optou-se por reprojetar o dispositivo da Roda para utilizar outro tipo de sensor de torque de baixo custo. A seguir é descrito o novo projeto concebido e construído para o presente trabalho.

O sensor de medição da rotação do medidor da Omega continuou funcionando, apenas o sensor de torque foi danificado. Desta forma, optou-se no novo projeto pela manutenção no sensor instalado no eixo, funcionando apenas como medidor de rotação.

As Figuras 8 e 9 apresentam as vistas da nova montagem. O sensor de torque utilizado foi o modelo HTNJ501-01-5NM. O sensor selecionado apresenta uma leitura de fundo de escala de 5 Nm, com resolução de 0,1%. Seu custo é baixo, cerca de US$ 100.

O novo sensor apresenta geometria que obriga a passagem do eixo por seu interior. Assim, um novo projeto de acoplamento do motor com o eixo da roda foi realizado, como mostra a Figura 9. A montagem da roda e seu acoplamento com o sensor de torque da Omega (agora apenas operando como sensor de rotação) foi mantida tal qual o projeto original. Uma placa de alumínio com um furo para a passagem do eixo foi fixada em posição vertical à base da mesa. O novo sensor de torque foi fixado a esta placa com o eixo passando por seu interior. Uma extensão do eixo com acoplamento flexível foi adaptada ao equipamento. A outra extremidade do sensor de torque foi fixada a uma segunda placa vertical de alumínio com furo central para a passagem da ponta do eixo. Esta placa foi montada em balanço. O conjunto motor e caixa de redução foi acoplado ao eixo e fixado à placa em balanço.

Durante a operação da roda o torque imposto pelo motor é transmitido pela placa em balanço para o sensor de torque que sofre esforço de torção indicando o valor do torque. As fotografias apresentadas na Figura 10 e 11 complementam a visão do novo sistema de medição construído.

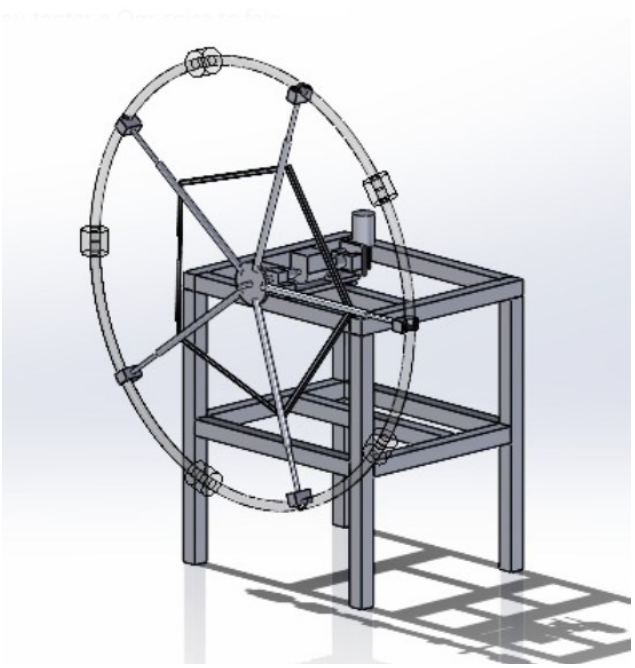


Figura 8: Aparato experimental atual

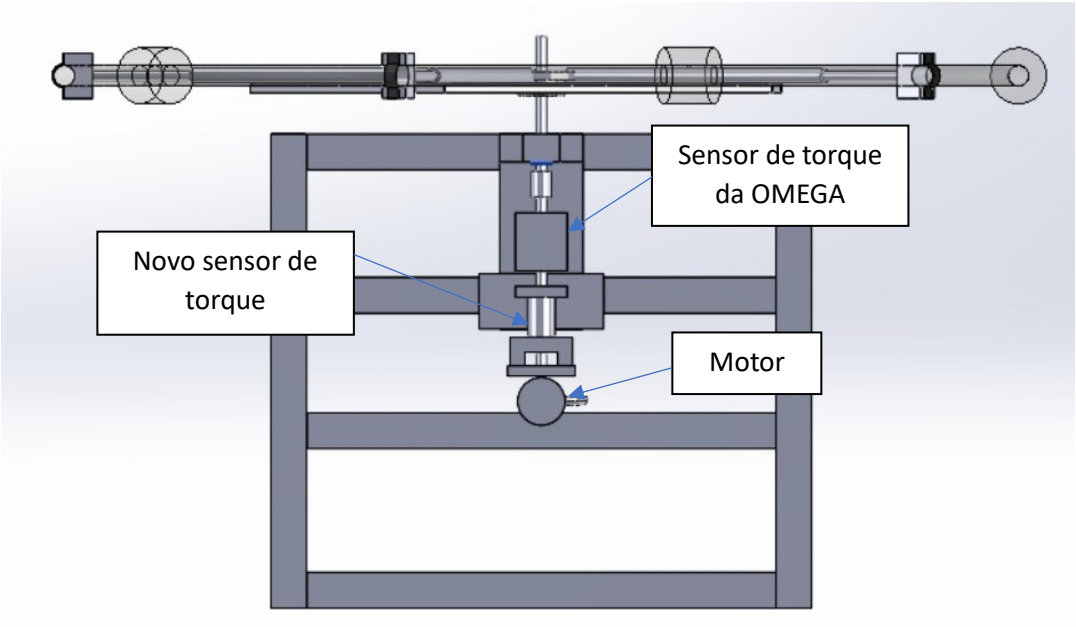



Figura 9: Vista superior do aparato experimental

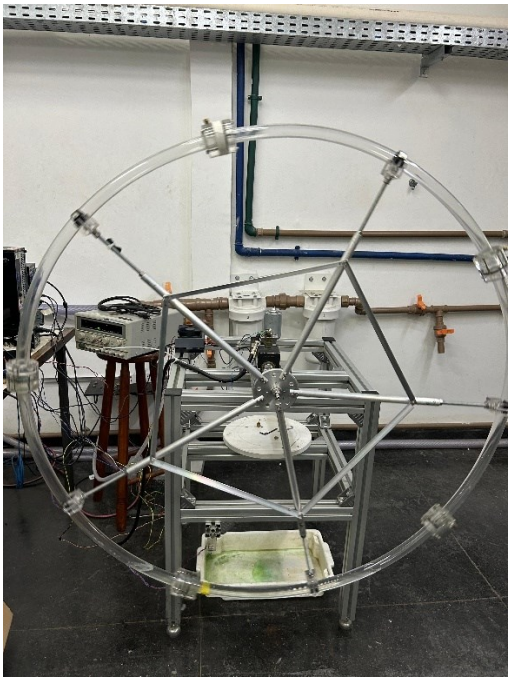


Figura 10: Fotografia do experimento atual

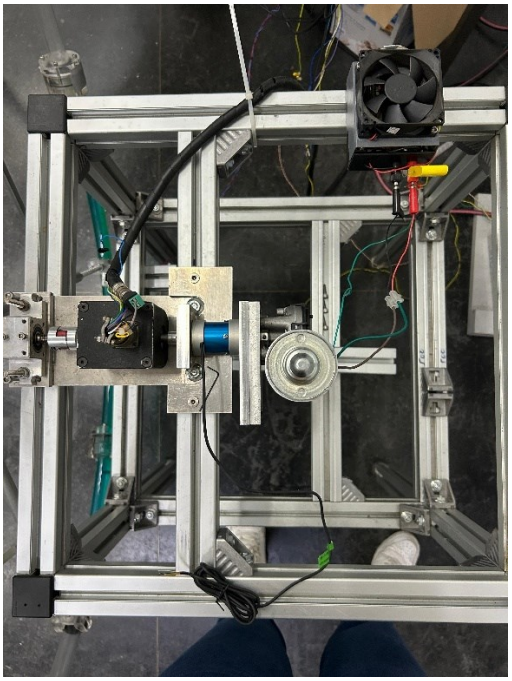


Figura 11: Fotografia da vista de cima do experimento atual

## 3.3.
## Procedimento Experimental

Os ensaios com os redutores de atrito eram precedidos por três procedimentos experimentais: calibração estática do medidor de torque, calibração dinâmica da Roda e preparação das amostras. Estes procedimentos são descritos a seguir.

### 3.3.1.
### Calibração estática do medidor de torque

Antes de cada ensaio o medidor de torque era calibrado estaticamente utilizando-se massas conhecidas fixadas na periferia da roda como mostrado na foto da Figura 12. O uso de diferentes massas permitia a construção de uma curva de calibração relacionando a tensão de saída do medidor de torque com o torque aplicado.

Figura 12: Calibração estática do medidor de torque com massas fixadas à roda

Foram medidas diferentes voltagens para diferentes massas. Este teste foi realizado em vários dias diferentes a fim de garantirmos a repetibilidade dos resultados. No entanto, os resultados expostos serão das últimas calibrações e das

últimas medições de amostras. Na Figura 13, temos o gráfico relativo à última medição de calibração.

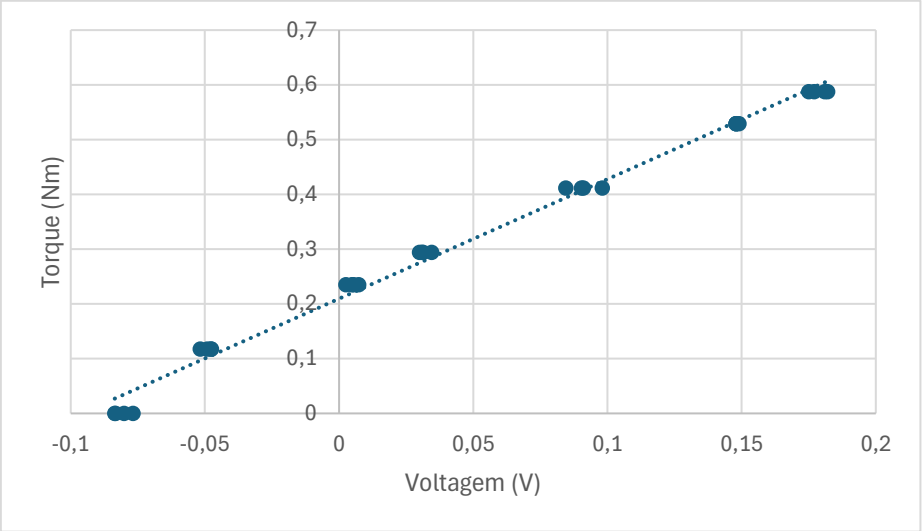



Figura 13: Resultado da curva de calibração Torque versus tensão realizada em 15/06

.

Ajustes lineares eram obtidos do ensaio de calibração, gerando a relação, onde T representa o torque em N.m e V a tensão em volts.

$$T = 2{,}2\ V + 0{,}2095 \qquad \text{eq. (3.5)}$$

### 3.3.2.

### Calibração dinâmica da roda

Após a calibração estática, a roda era colocada em movimento sem a adição do fluido de trabalho. Esta calibração com a roda vazia era destinada a medir os torques gerados pelo atrito mecânico nos mancais e acoplamentos, assim como o torque gerado pela resistência do ar da sala imposta à roda em movimento. Inicialmente foram realizados ensaios de calibração para diferentes faixas de velocidade de rotação, velocidades estas que também foram usadas posteriormente nos testes com o fluido de trabalho. Os torques medidos para cada rotação nestes ensaios de calibração dinâmica eram subtraídos dos torques medidos nos ensaios com o líquido dentro da roda de modo a obter-se o toque desejado, somente devido à interação da tensão cisalhante do líquido sobre a parede do tubo da roda.

No entanto, a configuração da Roda disponível impôs algumas limitações aos testes. A redução de atrito só ocorre para escoamentos no regime turbulento. Assim, é necessário selecionar uma velocidade de rotação da roda que garanta esta

condição. Ainda, há uma máxima rotação permitida acima da qual o líquido é carreado pela roda inviabilizando os testes. Também foi verificado que o produto Liovac quando adicionado ao C12 produzia espuma caso a rotação da roda fosse ajustada acima de certo valor, inviabilizando os testes. Considerando todas estas limitações, e após testes preliminares, optou-se por conduzir testes na velocidade de 1,5 m/s. Desta forma, os resultados a seguir são baseados nesta velocidade fixa.

Tabela 1: Média da calibração dinâmica da roda em vazio

| Velocidade Regulada (m/s) | Velocidade Medida (m/s) | Tensão (V) | Torque (N.m) |
|---|---|---|---|
| 1,5 | 1,48 | 0,19 | 0,42 |

A média dos dados coletados do teste realizado no dia 15/06 é apresentado na Tabela 1 e na Figura 14.

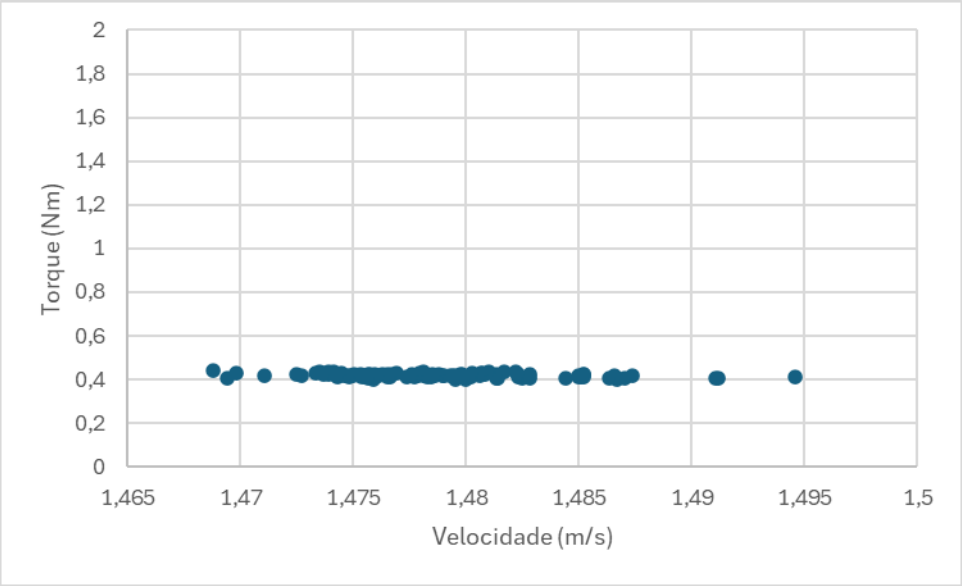



Figura 14: Resultados da calibração dinâmica da roda no dia 15/06

### 3.3.3.

### Preparação das amostras

Os testes conduzidos neste trabalho tiveram como foco o estudo do redutor de atrito poli-isobuteno, disponível em sua versão comercial denominada Liovac. A formulação comercial é fornecida em concentração de 1,5% em volume. O fluido utilizado nos testes foi o hidrocarboneto $C_{12}$. Foram testados o $C_{12}$ puro, para fins de comparação, e posteriormente soluções com adição de poli-isobuteno com concentrações de 100, 200 e 300 ppm em volume. A massa específica e a viscosidade do $C_{12}$ na temperatura de 20ºC são, respectivamente 753 kg/m$^3$ e 1,34 mPa.s.

As amostras foram preparadas pesando-se as quantidades do $C_{12}$ e Liovac necessárias para produzir as concentrações de teste. Uma balança marca Gehaka AG 200 com resolução de $10^{-3}$ gramas foi utilizada nas pesagens. A massa específica do produto Liovac é 747 kg/m3.

### 3.3.4.

### Testes com fluidos

Os testes com os fluidos foram conduzidos com os procedimentos descritos a seguir. Cada teste era realizado para diversos valores da velocidade de rotação pré-estabelecidos, no entanto só será exposto o teste com velocidade regulada de 1,5 m/s, velocidade base escolhida. O volume de $C_{12}$ considerado adequado para os testes era de 400 mL. O fluido ainda sem o redutor de atrito era introduzido na roda pela porta disponível em um dos flanges de acoplamento da roda. A velocidade de rotação da roda selecionada para um determinado teste era ajustada no controlador da roda. Após o acionamento da roda, era aguardado o tempo necessário para a aceleração e estabilização da velocidade de rotação da roda. Após a estabilização o sistema de aquisição de dados era acionado gravando as medidas de torque e rotação para posterior análise.

No caso do fluido puro sem redutor de atrito, a rotação e o torque permaneciam constantes ao longo do experimento, pois não havia variação da tensão cisalhante do fluido sobre a parede da roda, já que os experimentos eram conduzidos à temperatura constante. Estes experimentos com fluido sem redutor de

atrito podiam, portanto, ser de curta duração, tipicamente, 10 a 15 minutos. Estes resultados para o torque na roda obtidos para o fluido sem a adição de redutor de atrito eram armazenados para posteriormente servirem de base de comparação com os testes com a adição do redutor de atrito.

Terminado o teste com o fluido puro, o fluido era drenado da roda. Um volume de 400 mL do fluido com a quantidade desejada de redutor de atrito era introduzido na roda. A roda era acionada para a velocidade de rotação pré-determinada do teste desejado e o tempo de estabilização do torque era esperado. Após a estabilização, a gravação dos dados de torque e rotação era acionada. A duração dos testes com redutor de atrito adicionado ao fluido era variável, pois um dos objetivos principais do estudo era avaliar a degradação dos redutores de atrito promovido pelo cisalhamento na parede do tudo e pela turbulência do escoamento. Alguns testes com até 7 horas de duração foram conduzidos.

Antes de ser introduzida na roda, uma amostra era retirada da solução de $C_{12}$ com o redutor de atrito para um dado teste. Esta amostra era acondicionada em um recipiente fechado e posteriormente era utilizada na medição da viscosidade. Um viscosímetro Myr serie VR 3000 foi utilizado nestas medições. Foi medida a viscosidade do $C_{12}$ a fim de obter uma certeza do bom funcionamento do viscosímetro, e em seguida foram medidas as viscosidades das misturas com 100, 200 e 300 ppm para saber se houve alteração na viscosidade, pois uma possível alteração poderia explicar resultados da variação de torque.

# 4.
# Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na avaliação do redutor de atrito poli-isobuteno diluído em C12. Como já mencionado, este componente foi utilizado em sua forma comercial disponível no produto Liovac. Porém, antes da apresentação dos resultados do desempenho do redutor de atrito, testes de validação da roda e do procedimento experimental adotado serão apresentados.

## 4.1.
## Testes de validação da Roda

Os testes de validação da Roda e de toda a metodologia experimental proposta foram realizados determinando-se os fatores de atrito para o $C_{12}$ sem adição de redutor de atrito. Estes resultados podem ser comparados a correlações para fator de atrito disponíveis na literatura.

As correlações para fator de atrito em escoamento turbulento em dutos de seção circular com curvatura propostas por White [32] e Ito [33] foram utilizadas seguindo a recomendação do trabalho de White and Bond em 1971 [38]. Estas correlações são apresentadas a seguir,

$$Cf = 0{,}08Re^{-0{,}25} + 0{,}012\left(\frac{D}{2R}\right)^{0{,}5} \qquad \text{eq. (4.1)}$$

$$Cf = 0{,}076Re^{-0{,}25} + 0{,}0725\left(\frac{D}{2R}\right)^{0{,}5} \qquad \text{eq. (4.2)}$$

Nas correlações acima, o número de Reynolds é baseado no diâmetro do tubo e na velocidade tangencial de rotação da roda,

$$Re = \frac{\rho\omega RD}{\mu} \qquad \text{eq. (4.3)}$$

Nas correlações acima, o número de Reynolds é baseado no diâmetro do tubo e na velocidade tangencial de rotação da roda,

$$Re = \frac{\rho\omega RD}{\mu} \qquad \text{eq. (4.4)}$$

A Tabela 2 apresenta a média dos resultados utilizando-se $C_{12}$ como fluido.

Tabela 2: Resultados dos testes de validação da roda operando com C12

| Velocidade Regulada (m/s) | Velocidade Medida (m/s) | Tensão (V) | Torque (N.m) |
|---|---|---|---|
| 1,5 | 1,5 | 0,38 | 0,85 |

O mesmo gráfico foi plotado para visualização da média dos resultados do teste realizado no dia 15/06. Estes são apresentados na Figura 15.

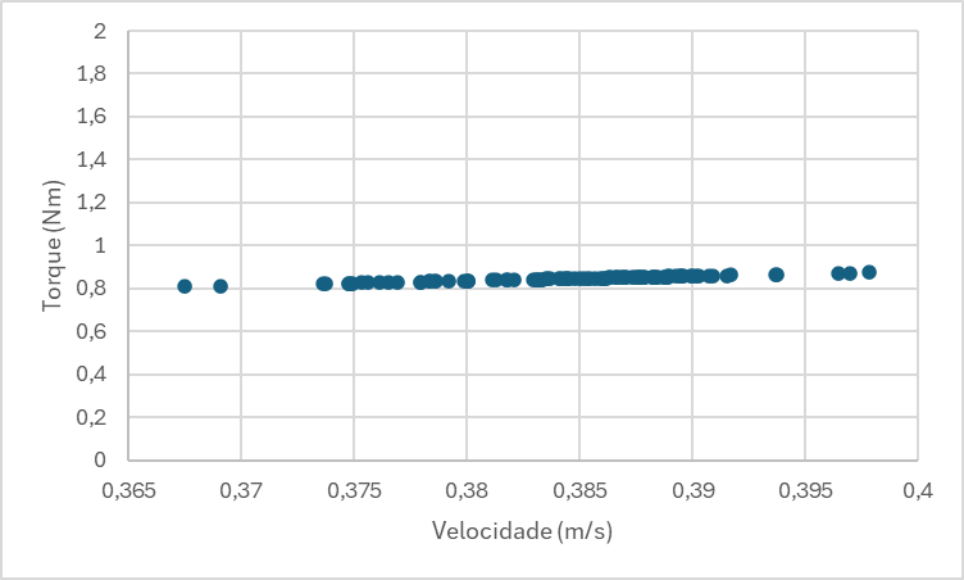



Figura 15: Relação Torque x Velocidade para o C12 puro.

Testes com a roda sem líquido realizados antes de cada medição como descrito na seção do procedimento experimental foram conduzidos e os valores subtraídos dos resultados para o líquido presente na roda.

Confirmado as exatidões do aparato experimental, pôde-se calcular o torque devido apenas ao fluido que escoa dentro da tubulação. Calculando a diferença de torques, cujo resultado foi de 0,43 N.m, temos o torque relativo apenas à tensão cisalhante do fluido na parede do tubo. Este resultado também pôde ser plotado em um gráfico que analisa os torques e velocidades médios de ambos os testes, para assim obter um resultado mais preciso.

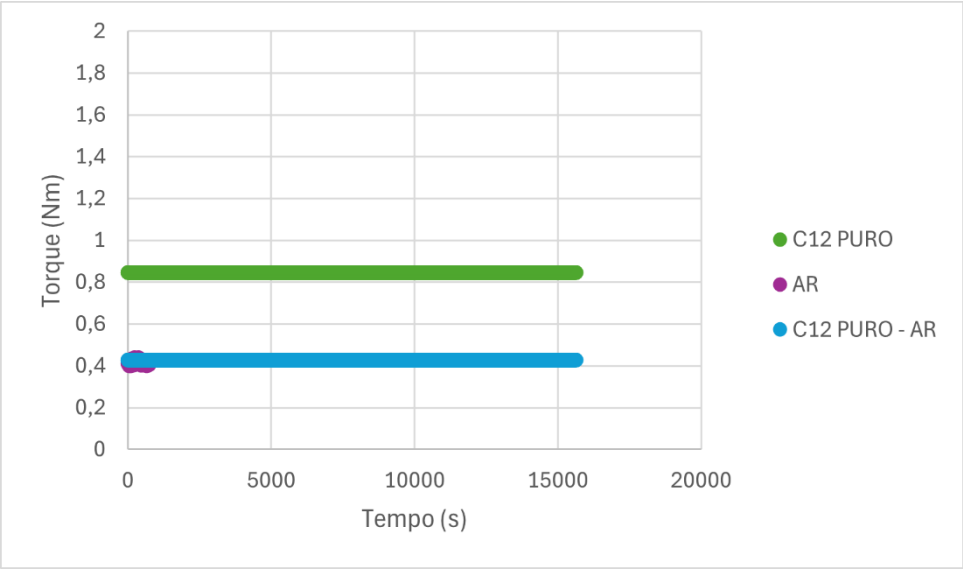



Figura 16: Resultados do teste de validação em 15/06 da roda operando apenas com ar, com C12 e a diferença entre ambos

Neste estágio, obtém-se o torque de referência, que é o torque causado apenas pelo fluido em escoamento. Após cada teste com a solução de $C_{12}$ e polímero, será necessário subtrair o torque medido no teste com ar para determinar o torque líquido.

Com isso, temos os dados necessários para obter os coeficientes teóricos de White e Ito, assim como o coeficiente de Fanning e o coeficiente experimental, sendo eles mostrados na tabela 3 e na Figura 7.

Tabela 3: Resultados dos testes de validação da roda operando com C12

| Velocidade Regulada (m/s) | Reynolds (Re) | Coef. Teórico - Ito | Coef. De Fanning |
|---|---|---|---|
| 1,5 | 2,19E+04 | 0,0126 | 0,0137 |

Nesta tabela pode ser analisado o comportamento dos coeficientes de atrito com relação ao número de Reynolds. Com a análise gráfica, percebe-se que os valores de coeficiente de atrito de Fanning experimental e teórico de Ito apresentam uma diferença de apenas 8% aproximadamente. Essa proximidade entre os valores teóricos e experimentais reforça a validade da teoria proposta por Ito em comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

## 4.2.

## Resultados para fluido com redutor de atrito

Nesta seção são apresentados os resultados que formam o principal objetivo do trabalho realizado, que é avaliar o desempenho de redutor de atrito em escoamento turbulento.

As concentrações testadas do agente ativo poli-isobuteno foram 100, 200 e 300 ppm.

Abaixo, temos os resultados da variação de torque com o tempo, já subtraídas do torque do ar. Isto é, o gráfico abaixo mostra o torque referente apenas às tensões cisalhantes na parede do tubo, agora com o redutor de atrito, que ao degradar com o tempo, vai perdendo seu efeito, tendendo a chegar no torque do líquido puro, o $C_{12}$.

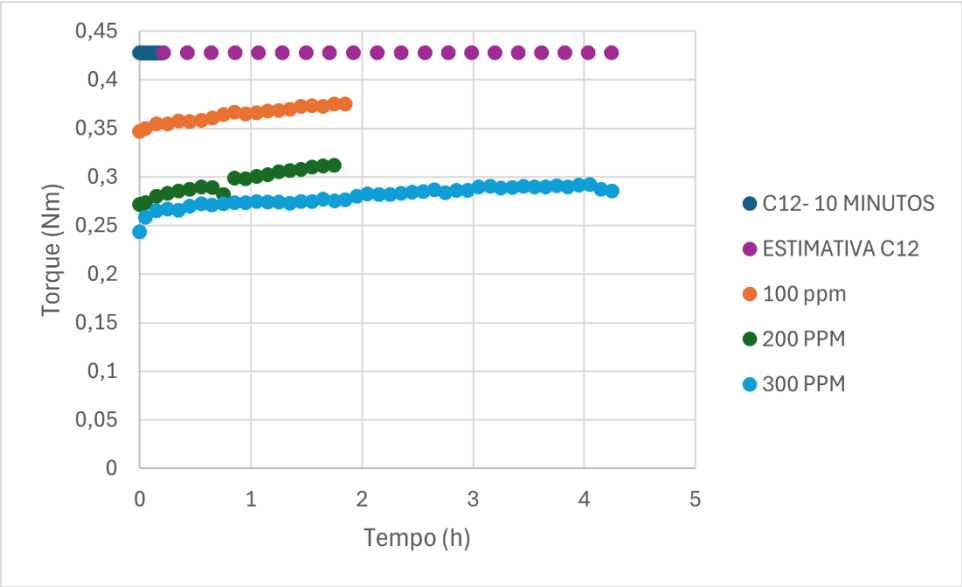



Figura 17: Resultados da variação de torque com o tempo para diferentes concentrações

Estes resultados poderiam ser diferentes se a mistura passasse a indicar uma variação na viscosidade, o que não aconteceu. A diferença de viscosidade medida pelo viscosímetro era desprezível, e os resultados experimentais corroboraram esta análise.

Na Figura 18, os resultados para os torques da figura anterior são apresentados na forma de coeficientes de atrito utilizando a equação 4.3 podemos ver que a variação do coeficiente de atrito em relação ao $C_{12}$ para as concentrações de 300 ppm, 200 ppm e 100 ppm são, respectivamente, 80%, 65% e 20%. Nas duas

primeiras horas o decréscimo era mais pronunciado, e a partir deste momento o torque começava a aumentar mais lentamente.

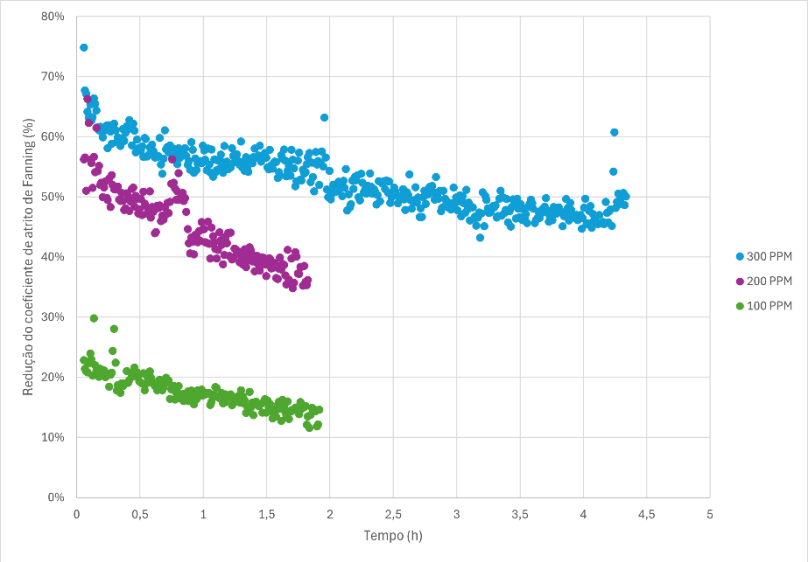



Figura 18: Resultados da variação do coeficiente de atrito de Fanning com o tempo para diferentes concentrações

# 5.
# Conclusão

O presente trabalho investigou a eficácia de um fluido redutor de atrito em misturas, com foco na redução do atrito em sistemas de transporte de fluidos. Os resultados obtidos demonstraram que o fluido redutor de atrito cumpriu seu papel conforme esperado. Observou-se que, à medida que as proporções de redutor de atrito na mistura aumentavam, o torque requerido para o transporte do fluido diminuía, confirmando a eficiência do redutor de atrito na mitigação das forças resistivas.

No entanto, ao longo do tempo, o redutor de atrito apresentou sinais de degradação, o que resultou na alteração das suas propriedades iniciais. Com a degradação, o torque medido passou a se assemelhar ao torque do líquido base, sem a presença do redutor. Este comportamento indica que, apesar da eficácia inicial, o desempenho do redutor de atrito decresce com o tempo de uso contínuo. Vale ressaltar que o comportamento observado pode ser considerado newtoneano, pois mantendo o número de Reynolds fixo, temperatura fixa e a velocidade angular fixa, a viscosidade praticamente não sofreu alteração.

Esses resultados destacam a eficiência e o potencial do fluido redutor de atrito, sugerindo que este é um candidato promissor para futuras aplicações na indústria de petróleo, onde a redução de atrito nos dutos pode resultar em economia significativa de energia e custos operacionais. No entanto, é imperativo reconhecer que o escopo deste estudo foi limitado e não permitiu a realização de testes de longa duração. 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 ±6% de incerteza.

Para avançar na compreensão e aplicação prática do redutor de atrito, recomenda-se a realização de testes adicionais que contemplem períodos prolongados de operação. Esses testes devem focar na avaliação da degradação do redutor de atrito ao longo do tempo, e incluir o fator temperatura, para simular com maior precisão as condições reais encontradas em dutos de petróleo. Também é interessante fazer a medição das propriedades elásticas do fluido, para melhor compreensão dele. A incorporação dessas variáveis, como temperatura e pressão,

em estudos futuros permitirá uma avaliação mais completa e representativa da eficácia do redutor de atrito em cenários operacionais reais.

# 6.
# Referências

[1] TOMS, B. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. In: Proceedings of the 1st International Congress on Rheology. London: Faraday Society, 1948. p. 135-141.

[2] SELLIN, R. H. J.; OLLIS, D. F. The effect of drag reducing additives on flow patterns and drag coefficients in rough pipes. Journal of Hydrology, v. 46, p. 65-80, 1980.

[3] KHALIL, I. M.; HEMIDA, H.; EL-GAMAL, M.; ZAHER, H. M. Drag reduction by polymer additives. Journal of Hydraulic Research, v. 40, n. 3, p. 251-262, 2002.

[4] LINDGREN, E. R.; ELIAS, K. L.; SMITH, F. G. Drag reduction in the Trans-Alaska Pipeline. Journal of Petroleum Technology, v. 31, n. 9, p. 1,162-1,168, 1979.

[5] SOARES, Edson J.; PEREIRA, Antonio S.; MEDEIROS, Marcos A. F.; LIMA, Leandro R. P. Degradation of drag reducing polymers in turbulent pipe flow. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 222, p. 104-112, 2015.

[6] REYNOLDS, W. C.; MENEVEAU, C.; KASSINEN, A.; LEE, M. Influence of polymer concentration and molecular weight on turbulent drag reduction. Journal of Fluid Mechanics, v. 729, p. 106-126, 2013.

[7] LUMLEY, J. L. Drag reduction by additives. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 1, p. 367-384, 1969.

[8] TABOR, M.; DE GENNES, P. G. A cascade theory of drag reduction. Europhysics Letters, v. 2, n. 7, p. 519-522, 1986.

[9] OLDROYD, J. G. The elastic and viscous properties of emulsions and suspensions. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 218, n. 1132, p. 122-132, 1949.

[10] KOSTIC, M. A. The mechanism of polymer drag reduction and its significance. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 15, n. 2, p. 169-178, 1994.

[11] SURESHKUMAR, R.; BERIS, A. N. Effect of artificial stress diffusivity on the stability of numerical calculations and the flow dynamics of time-dependent viscoelastic flows. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 60, n. 1, p. 53-80, 1996.

[12] KAWAGUCHI, Y.; ELSAFAWY, A.; HASEGAWA, T.; EGAWA, K. Direct numerical simulation of turbulent channel flow with surfactant additives. International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 23, n. 5, p. 639-646, 2002.

[13] PTASINSKI, P. K.; WILLIAMS, P. R.; SENTER, J.; LINDEN, P. F. Polymer drag reduction in a turbulent flow: effects of molecular weight and concentration. Journal of Fluid Mechanics, v. 478, p. 1-38, 2003.

[14] LIBERATORE, M. W.; MYERS, M. R.; KALIKA, D. S.; SOLOMON, M. J. Morphological and hydrodynamic scaling in drag reducing polymer solutions. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 123, n. 2-3, p. 175-190, 2004.

[15] MIN, T.; CHOI, H.; JOSHI, S.; SANDHAM, N. D. Direct numerical simulation of turbulent channel flow with a wall oscillation. Journal of Fluid Mechanics, v. 497, p. 91-100, 2004.

[16] PTASINSKI, P. K.; VAN DEN BRULE, B. H. A. A.; HULSHOF, J.; TOWNSEND, P. F. Electrospinning of submicron polymer fibers using high oscillating electric fields. Physics of Fluids, v. 13, n. 11, p. 3000-3012, 2001.

[17] WARHOLIC, M. D.; MASSAH, H.; HANRATTY, T. J. Influence of drag reducing polymers on turbulence: effects of Reynolds number, concentration and mixing. Experiments in Fluids, v. 27, n. 5, p. 461-472, 1999.

[18] FONTAINE, A. A.; WILLIAMS, M. C.; MARTIN, J. R. Experimental investigation of polymer drag reduction in a turbulent boundary layer. AIAA Journal, v. 30, n. 9, p. 2432-2438, 1992.

[19] McCOMB, W. D.; RABIE, M. F. Effects of polymer additives on the structure of turbulent boundary layers. Journal of Fluid Mechanics, v. 88, n. 1, p. 25-55, 1979.

[20] ELPERIN, I. T.; GRIGOR'EV, N. A.; ROGANOV, A. S. On the mechanism of drag reduction by polymer additives. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, v. 8, n. 5, p. 52-59, 1967.

[21] BUSHNELL, D. M.; MOORE, K. J. Drag reduction in nature. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 23, p. 65-79, 1991.

[22] MIN, T.; CHOI, H.; JOSHI, S.; SAMI, N. Direct numerical simulation of turbulent channel flow with polymer additives. Journal of Fluid Mechanics, v. 486, p. 213-238, 2003.

[23] BAIK, Y.; LEE, S. J.; CHO, Y. H.; CHOI, H. Polymer drag reduction in a turbulent boundary layer using particle image velocimetry. Experiments in Fluids, v. 38, n. 5, p. 743-752, 2005.

[24] KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, v. 30, n. 4, p. 301-305, 1941.

[25] VIRK, P. S. Drag reduction fundamentals. AIChE Journal, v. 21, n. 4, p. 625-656, 1975.

[26] DUBIEF, Y.; WHITE, C. M.; TERRAPON, V. E.; SHAQFEH, E. S. G.; MOIN, P.; LELE, S. K. Polymer drag reduction in a turbulent boundary layer: effects of the polymer properties and flow conditions. Journal of Fluid Mechanics, v. 514, p. 271-280, 2004.

[27] MERRILL, E. W.; HORN, A. F. Polymer degradation in turbulent flow. Journal of Applied Polymer Science, v. 29, n. 3, p. 895-901, 1984.

[28] CHOI, H.; MIN, T.; KANG, S. A. Mechanism of polymer degradation in turbulent flow. Physics of Fluids, v. 12, n. 7, p. 1517-1526, 2000.

[29] NAKKEN, T.; GRIGORIEV, A. Y.; BOGHOSIAN, S. Investigation of polymer degradation in turbulent pipe flow. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 97, n. 2-3, p. 295-311, 2001.

[30] VANAPALLI, S. A.; SOLOMON, M. J.; SCHROEDER, C. M.; MCGREERY, H. F.; HOCKY, G. Polymer degradation and drag reduction in a turbulent boundary layer. Nature Materials, v. 4, p. 504-510, 2005.

[31] PEREIRA, A. S.; SOARES, E. J. Drag reduction induced by polymer degradation in turbulent pipe flow. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 179-180, p. 55-62, 2012.

[32] WHITE, C. M. The drag reduction properties of high polymers in turbulent flow. Journal of Applied Polymer Science, v. 13, n. 2, p. 119-128, 1969.

[33] ITO, H. Turbulent friction in smooth and rough pipes. Journal of Fluid Mechanics, v. 30, n. 4, p. 737-744, 1967.

[34] DIMITROPOULOS, C. D.; KASSINEN, A.; BERIS, A. N.; WILLIAMS, M. C. Direct numerical simulation of viscoelastic turbulent channel flow exhibiting drag reduction: Effect of the variation of rheological parameters. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 130, n. 1, p. 1-18, 2005.

[35] ESCUDIER, M. P.; PRENTER, S.; SMITH, S. The effect of drag reducing agents on turbulent flow of water in a pipe. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 81, n. 3, p. 197-213, 1999.

[36] SELLIN, R. H. J.; WATSON, R. J.; SPARKS, R. A. Industrial applications of drag reducing polymer additives. Nature, v. 299, n. 5882, p. 325-330, 1982.

[37] WHITE, C. M.; MUNGAL, M. G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 40, p. 235-256, 2008.

[38] WHITE, F. M.; BOND, J. D. Experimental study of fluid friction in a rotating disk apparatus. Journal of Fluid Mechanics, v. 45, n. 3, p. 549-574, 1971.