



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Rafael Riera Schettino Pereira das Neves

Estudo sobre a Degradação do Polímero Redutor de Atrito Poli-Isobuteno em Escoamentos Turbulentos

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

Orientador: Luis Fernando Azevedo
Coorientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por essa oportunidade e fazer com que fosse possível começar e chegar até aqui. Sem ele nada faria sentido. Suas bênçãos e orientações, fizeram com que essa jornada pudesse existir.

Também gostaria de agradecer aos meus pais, pelo apoio prestado ao longo de todos esses anos de minha graduação. Sempre conseguindo desviar dos empecilhos e dificuldades que a vida nos apresenta, para que fosse possível estudar engenharia na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, faculdade que é referência mundial.

Meu profundo agradecimento à Vice-reitoria Comunitária, junto ao Professor Augusto, os quais me receberam de braços abertos e possibilitaram que eu continuasse e concluísse minha graduação.

Agradeço a todo corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Puc-Rio, o qual nunca mediu esforços para ajudar e sanar dúvidas cotidianas. Cabe destacar um agradecimento direcionado à equipe do Laboratório de Engenharia de Fluidos e estagiários, que não mediram esforços para proporcionar um ambiente exemplar de trabalho e pesquisa.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, pela paciência e calma, ao replicar seus vastos conhecimentos nesses meses trabalhando juntos para o desenvolvimento do projeto. Sempre estando aptos para questionamentos e possíveis soluções.

Agradeço também a todos os meus colegas e amigos que pude fazer durante essa árdua jornada na universidade. Sem o auxílio e companheirismo de vocês não seria possível completar esse ciclo. Obrigado por fazerem com que a caminhada fosse mais divertida.

Por fim, gostaria de dedicar este trabalho, que fecha uma etapa muito importante em minha vida, e me torna Engenheiro Mecânico, ao meu querido amigo Bruno Queiroz, que faleceu em nosso primeiro período de faculdade, mas que tenho toda certeza de que está orgulhoso desta conquista, ao lado de Deus.

A todos, muito obrigado pelo incentivo e companheirismo ao longo dos anos.

Resumo

PEREIRA DAS NEVES, Rafael Riera Schettino. **Estudo sobre a degradação do polímero redutor de atrito poli-isobuteno em escoamentos turbulentos**. Rio de Janeiro, 2024. 51 páginas. Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desde a descoberta de Toms em 1948, que revelou como a adição de polímeros de alto peso molecular em escoamentos turbulentos em dutos pode reduzir drasticamente a queda de pressão, esse fenômeno tem sido amplamente estudado. Diversas pesquisas foram conduzidas com o objetivo de aprimorar processos industriais, tornando-os mais econômicos e eficazes. Em dutos longos a perda por atrito entre o fluido e a parede é responsável por quase a totalidade da queda de pressão e, conseqüentemente, do consumo de energia necessário para o transporte dos fluidos. A redução do atrito pela adição de polímeros de cadeia molecular longa no escoamento monofásico de líquidos em dutos já é conhecida, porém, no escoamento bifásico é menos explorada na literatura.

Aqui está uma versão revisada do resumo incluindo informações sobre a degradação:

Este trabalho visa contribuir para o entendimento dos efeitos da injeção de polímero redutor de atrito em escoamento bifásico gás-líquido, focando no desempenho e na degradação do poli-isobuteno, utilizado na indústria de óleo e gás. Foram avaliados o potencial de redução de atrito na fase líquida e a degradação do polímero causada por cisalhamento contínuo e turbulência. Os testes ocorreram em uma bancada com um tubo em círculo girante, configuração inovadora que simula resultados de bancadas convencionais, mas com menor uso de produto e sem necessidade de bombas adicionais que poderiam acelerar a degradação do polímero.

Os estudos conduzidos envolveram o teste de 3 concentrações do polímero poli-isobuteno misturado ao solvente C₁₂, 100, 80, 60 e 40 ppm. Os testes de degradação realizados por 3 horas a um número de Reynolds fixo de 26.630 indicaram que tivemos uma redução de atrito de respectivamente 20%, 13%, 14% e 9%, em relação as concentrações do polímero. Demorando cerca de 150 minutos

para chegar em um valor nulo. O tempo de degradação do polímero mostrou-se pouco influenciado pela concentração testada. Os resultados destacam sua aplicabilidade na indústria. Estudos adicionais, incluindo variáveis como Reynolds, temperatura e pressão, e ensaios mais longos, são recomendados para avaliar melhor seu desempenho em condições reais.

Palavras-chave

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

Abstract

PEREIRA DAS NEVES, Rafael Riera Schettino. **Study on the degradation of the friction-reducing polymer polyisobutene in turbulent flows**. Rio de Janeiro, 2024. 51 pages. Undergraduate Project – Department of Mechanical Engineering, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

Since the discovery by Toms in 1948, which revealed how the addition of high molecular weight polymers in turbulent flow through pipes can drastically reduce pressure drop, this phenomenon has been widely studied. Numerous studies have been conducted with the aim of improving industrial processes, making them more cost-effective and efficient. In long pipelines, frictional losses between the fluid and the wall are responsible for nearly the entire pressure drop and, consequently, the energy consumption required for fluid transport. While the friction reduction due to the addition of long-chain polymers in single-phase liquid flows through pipes is well-documented, its application in two-phase flow remains less explored in the literature.

This work aims to contribute to the understanding of the effects of injecting drag-reducing polymers in gas-liquid two-phase flow, focusing on the performance and degradation of polyisobutene, which is widely used in the oil and gas industry. The potential for friction reduction in the liquid phase and the degradation of the polymer caused by continuous shear and turbulence were evaluated. The tests were conducted on a rotating circular pipe apparatus, an innovative setup that replicates the results of conventional test benches but requires less product and eliminates the need for additional pumps that could accelerate polymer degradation.

The study involved testing three concentrations of polyisobutene mixed with a C12 solvent: 100, 80, 60, and 40 ppm. Degradation tests conducted over 3 hours at a fixed Reynolds number of 26,630 indicated friction reduction levels of 20%, 13%, 14%, and 9%, respectively, depending on polymer concentration. The friction reduction gradually declined to zero after approximately 150 minutes. The polymer degradation time showed little dependency on the tested concentrations. The results highlight its applicability in industry. Additional studies, incorporating variables such as Reynolds number, temperature, pressure, and longer testing durations, are recommended to better assess its performance under real-world conditions.

Keywords

Friction Reduction; Pipeline Flow; Polymer Addition; Degradation;
Turbulent Flows.

Sumário

Introdução.....	12
Revisão da Literatura	14
Metodologia Experimental	26
Teoria da dinâmica funcional da roda	26
Aparato experimental da roda.....	28
Procedimento Experimental	33
Calibração estática do medidor de torque	33
Calibração dinâmica da roda	35
Preparação dos fluidos	35
Testes com fluidos.....	36
Resultados	37
Testes de validação da Roda.....	37
Resultados para fluido com redutor de atrito	41
Conclusão	45
Referências	47

Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes (White e Mungal, 2008).	17
Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda (Pope, 2000).	20
Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito (White e Mungal, 2008).	21
Figura 4: Eficiência do polímero em função do tempo (Pereira e Soares, 2012). .	24
Figura 5: Representação esquemática ilustrando o princípio de funcionamento da roda, utilizada para medir o atrito do fluido em contato com as paredes do tubo (White e Bond, 1971).	27
Figura 6: Representação esquemática da seção de testes desenvolvida em 2018..	28
Figura 7: Aparato experimental atual. (Fonte: Laboratório de Engenharia de Fluidos)	31
Figura 8: Vista superior do aparato experimental. (Fonte: Laboratório de Engenharia de Fluidos)	31
Figura 9: Fotografia com visão frontal do experimento.	32
Figura 10: Fotografia com visão superior do experimento.	32
Figura 11: Processo de calibração estática do medidor de torque utilizando massas fixadas à roda.	33
Figura 12: Princípio básico de calibração do sensor de torque.	34
Figura 13: Curva de calibração apresentando a relação entre Torque e Tensão.	34
Figura 14: Relação entre torque e velocidade para o C12 puro para os diferentes experimentos conduzidos.	38
Figura 15: Resultado de um teste da roda operando apenas com ar, com C12 e a diferença entre eles.	39
Figura 16: Resultado de todos os testes da roda operando com C12 e a diferença entre o coeficiente de atrito de Fanning e Ito	41
Figura 17: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 100 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C12.	42
Figura 18: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 80 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C12.	42
Figura 19: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 60 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C12.	43
Figura 20: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 40 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C12.	43

Figura 21: Variação da redução de arrasto ao longo do tempo para diferentes concentrações de poli-isobuteno.	44
---	----

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resultados dos testes de validação da roda operando com C_{12}38

Tabela 2: Resultados dos Testes de Verificação da Roda Operando com C_{12} 40

"A grandeza de uma pessoa não está em nunca cair, mas em se levantar toda vez que isso acontece.",

Confúcio

1.

Introdução

O estudo da redução de atrito por meio da adição de polímeros a escoamentos turbulentos tem sido foco de pesquisas há décadas, dado o seu potencial para otimizar sistemas de transporte de fluidos em diversos setores industriais. Conforme abordado por White e Mungal (2008), embora exista uma vasta pesquisa sobre o tema, as complexas interações entre polímeros e escoamentos turbulentos ainda permanecem como uma área de incerteza, estimulando o interesse tanto de pesquisadores quanto de setores industriais. A aplicação de polímeros para a redução de atrito em sistemas de escoamento não só oferece eficiência energética, mas também promove economia operacional e maior longevidade de equipamentos.

A redução de atrito em tubulações impacta diretamente na perda de carga do sistema, proporcionando uma menor necessidade de potência de bombeamento e, consequentemente, uma economia de energia significativa. Além disso, essa prática diminui o desgaste de componentes mecânicos, reduz vibrações nas linhas de escoamento e aumenta a integridade e confiabilidade do sistema. Com o avanço do entendimento sobre a redução de atrito, é possível desenvolver técnicas aplicáveis a uma ampla gama de setores, como o aumento da vazão em sistemas de combate a incêndio, a melhoria da eficiência em sistemas de irrigação e drenagem (Sellin & Ollis, 1980; Khalil et al., 2002), e até mesmo a diminuição de resistência em cascos de embarcações e submarinos, que podem atingir maiores velocidades com menor consumo energético.

A primeira aplicação comercial de polímeros como redutores de atrito ocorreu em 1979, no oleoduto do Sistema de Transporte de Petróleo do Trans-Alaska Pipeline (TAPS). Nessa aplicação, o polímero Conoco CDR elevou a capacidade de escoamento em aproximadamente 200.000 barris por dia ($1.325 \text{ m}^3/\text{h}$), demonstrando o potencial de aumento da vazão em grandes dutos de transporte. Contudo, desafios persistem quanto à escolha do tipo e da concentração ideal de polímeros para cada aplicação específica. Estudos, como o realizado por Winkel et al. (2006), indicam que o peso molecular e a concentração do polímero estão diretamente ligados à eficácia na redução de atrito, com maiores reduções observadas em polímeros de alto peso molecular e altas concentrações de fluxo.

Um dos principais desafios ainda enfrentados é a degradação dos polímeros ao longo do sistema de escoamento, especialmente em tubulações com bombas, válvulas e curvas acentuadas, que causam a quebra das cadeias poliméricas e comprometem a eficácia do efeito redutor de atrito (Soares et al., 2015).

O presente trabalho visa investigar a degradação dos polímeros em escoamentos turbulentos, utilizando um aparato experimental específico do tipo “roda”, que permite um ambiente controlado sem bombas, válvulas ou outras restrições. Esse sistema possibilita a análise da degradação polimérica exclusivamente pela ação do cisalhamento e da turbulência do fluxo, fornecendo dados mais precisos sobre o comportamento dos polímeros em condições de escoamento.

A estrutura deste documento é organizada da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o tema. No capítulo 3, é descrita a metodologia adotada para os testes e seus procedimentos. No capítulo 4 são discutidos os resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta as principais conclusões do estudo. E o capítulo 6 contém as referências bibliográficas utilizadas.

2.

Revisão da Literatura

A redução de atrito em escoamentos turbulentos através de polímeros é um fenômeno observado pela primeira vez em 1948 por Toms. (Lumley, 1973) descreve que Toms, em 1948 descobriu que a adição de pequenas quantidades de polímeros a um fluido podia reduzir significativamente a resistência ao escoamento. Desde então, este fenômeno tem sido amplamente investigado, levando a avanços na compreensão dos mecanismos envolvidos, da eficácia dos polímeros e das variáveis que influenciam a eficiência em condições de fluxo turbulento.

Os polímeros atuam alterando a estrutura da turbulência em regiões próximas às paredes do duto. Isso ocorre por meio de modificações na formação de vórtices e na dinâmica do fluido, reduzindo a dissipação de energia cinética e, conseqüentemente, o atrito. Estudos experimentais e simulações numéricas demonstram que a eficiência dessa redução depende de fatores como concentração, peso molecular do polímero e as condições de escoamento (Reynolds et al., 2013).

A literatura divide os mecanismos de redução de atrito em duas classes principais: as teorias baseadas nos efeitos viscosos e as teorias baseadas nos efeitos elásticos. A teoria dos efeitos viscosos, introduzida por Lumley em 1973, sugere que o aumento da viscosidade nas regiões próximas às paredes reduz a dissipação de energia associada à turbulência. O aumento da viscosidade suprime pequenos vórtices, que são as principais fontes de flutuações turbulentas em escoamentos turbulentos. Assim, mesmo em baixas concentrações, os polímeros podem promover uma redução significativa no atrito (Lumley, 1973).

Oldroyd, em 1949, reforçou esta visão ao destacar que o aumento da viscosidade efetiva em regiões de alta turbulência é um mecanismo essencial para a redução de atrito (Oldroyd, 1949, apresentada no projeto de graduação de Ian Consenza (2018)). Posteriormente, Kostic em 1994 mostrou que, além de reduzir a formação de pequenos vórtices, os polímeros podem até mesmo gerar uma laminarização parcial do fluxo turbulento. Essa transição ocorre devido ao alongamento das cadeias poliméricas, que interagem com as flutuações do fluido e amortecem as instabilidades em pequenas escalas (Kostic, 1994).

Estudos complementares, como os de Sureshkumar e Beris (1996), demonstraram que a adição de polímeros reduz as flutuações de vorticidade

próximas às paredes, enquanto Ptasinski et al. (2003) observaram que as tensões poliméricas dissipam energia turbulenta, reforçando a importância dos efeitos viscosos para a redução de atrito (Sureshkumar & Beris, 1996; Ptasinski et al., 2003).

A teoria dos efeitos elásticos, proposta por Tabor e De Gennes em 1986, foca na interação das moléculas de polímeros com as menores escalas de turbulência. As moléculas, ao serem estendidas pelas tensões de cisalhamento, interferem na cascata de Kolmogorov, que descreve a transferência de energia das grandes para as pequenas escalas. Esse mecanismo impede a formação de novos vórtices, reduzindo a dissipação de energia nas escalas menores (Tabor & De Gennes, 1986).

Segundo essa teoria, a elasticidade das moléculas é crucial para inibir a formação de vórtices turbulentos. Elperin et al. (1967) complementaram essa ideia ao sugerir que as moléculas de polímero redistribuem a energia cinética das flutuações turbulentas para escalas maiores, estabilizando o fluxo. Bushnell & Moore (1991) reforçaram que o peso molecular e o tempo de relaxamento das moléculas são determinantes para a eficiência elástica (Elperin et al., 1967).

No que se refere aos efeitos viscosos na redução de atrito, Liberatore et al. (2004) destacaram que a eficiência dessa redução não está necessariamente vinculada apenas ao peso molecular do polímero. Os autores propuseram que a distribuição das moléculas poliméricas desempenha um papel relevante no fenômeno, embora outros fatores também sejam cruciais. Entre eles, ressaltam-se a estrutura molecular do polímero, sua concentração na solução, e a interação entre as moléculas do polímero e o fluido base. Por exemplo, a conformação das cadeias poliméricas em solução – ou seja, se estas assumem uma forma mais estendida ou mais compacta – pode impactar de maneira significativa a capacidade do polímero em reduzir o arrasto.

Complementando essas observações, Min et al. (2004), Ptasinski et al. (2001) e Warholic et al. (1999) investigaram o comportamento das tensões de Reynolds durante a redução de atrito. Eles concluíram que o efeito máximo ocorre quando há uma drástica diminuição dessas tensões e quando os mecanismos geradores de turbulência são suprimidos pelas tensões induzidas pelas flutuações das cadeias poliméricas. Essa dinâmica explica as limitações observadas na redução de atrito promovida por polímeros.

Além disso, estudos realizados por Fontaine et al. (1992) e McComb e Rabie (1979) enfatizaram a relevância da camada limite no processo de redução de atrito em escoamentos turbulentos. Nessas condições, a atenuação da intensidade turbulenta e a redistribuição da energia cinética próxima às paredes resultam em uma redução significativa do atrito. Por outro lado, os efeitos nas regiões mais afastadas da camada limite são menos expressivos quando comparados aos que ocorrem nas proximidades das superfícies.

Por outro lado, a teoria da cascata proposta por Tabor e De Gennes (1986) apresenta uma abordagem alternativa sobre os efeitos dos polímeros no escoamento turbulento. Segundo essa teoria, o impacto dos polímeros é mais evidente nas pequenas escalas do escoamento, onde as tensões elásticas geradas pelas cadeias poliméricas se tornam comparáveis aos tensores de Reynolds. Essa interação é determinante, pois, conforme argumentam Tabor e De Gennes, os polímeros atuam inibindo a formação de novos vórtices – estruturas fundamentais para a dissipação da energia cinética turbulenta.

Esse efeito inibitório decorre do aumento do módulo elástico da solução polimérica, resultado do alongamento das cadeias poliméricas sob o campo de escoamento. O alongamento das moléculas interfere diretamente na cascata de energia descrita por Kolmogorov, reduzindo a transmissão de energia para escalas menores e, conseqüentemente, diminuindo a turbulência geral no fluxo. Esse fenômeno sugere que os polímeros não apenas dissipam energia, mas também alteram os mecanismos fundamentais de transferência de energia em escoamentos turbulentos.

Um ponto central dessa teoria é a exigência de uma concentração mínima de polímero para que os efeitos elásticos sejam percebidos no escoamento. Embora essa concentração seja tipicamente muito baixa, sua existência marca uma diferença conceitual significativa em relação a outras teorias que não consideram esse limiar. Esse aspecto reforça a ideia de que as propriedades do polímero, como elasticidade e conformação, desempenham papéis essenciais no comportamento do fluxo.

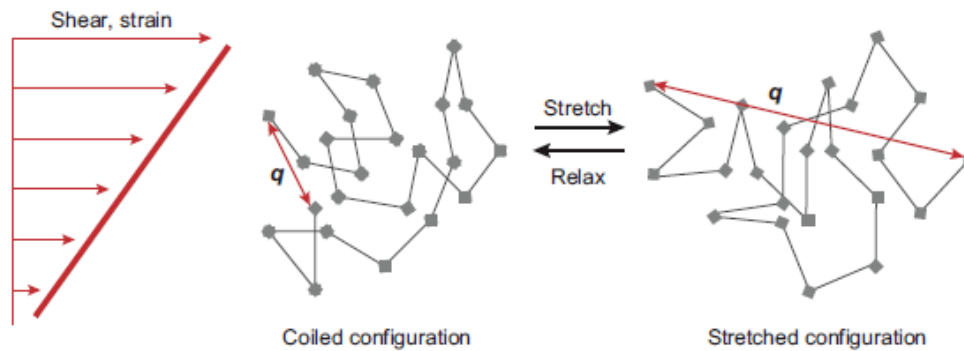


Figura 1: Estrutura da cadeia polimérica sujeita aos esforços cisalhantes (White e Mungal, 2008).

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado de uma estrutura polimérica, exemplificada pela molécula do óxido de polietileno. Nessa representação, o vetor "q" caracteriza a distância entre os extremos da cadeia polimérica, variando desde o período de relaxamento até o de estresse cisalhante ao longo do fluxo. Essa variação no vetor "q" reflete o grau de alongamento das cadeias poliméricas sob ação do escoamento.

Sob a ótica da teoria de Tabor e De Gennes, Elperin et al. (1967) sugeriram que a transferência de energia do escoamento turbulento para as cadeias poliméricas e o subsequente alongamento dessas moléculas explicam a modificação estrutural da turbulência, bem como a redução do atrito. Esse processo ocorre porque o alongamento das cadeias interfere nas pequenas escalas da cascata de energia, promovendo uma redistribuição da energia cinética turbulenta.

Além disso, Bushnell e Moore (1991) exploraram a relação entre a elasticidade das cadeias poliméricas e a redução de atrito, considerando diferentes pesos moleculares. Esses autores identificaram que a elasticidade desempenha um papel fundamental, especialmente em polímeros com elevada capacidade de deformação. No entanto, estudos posteriores, como o de Liberatore et al. (2004), apontaram que o aumento do peso molecular nem sempre está diretamente relacionado a uma maior redução de atrito. Esse resultado reforça a importância de outros fatores, como a conformação molecular e as interações entre as moléculas de polímero e o fluido base, para a eficiência do processo.

Min et al. (2003) destacaram a relevância do tempo de relaxamento das moléculas de polímero na eficiência da redução de atrito em escoamentos turbulentos. Os resultados demonstraram que polímeros com tempos de

relaxamento mais longos apresentam maior eficácia na supressão da turbulência e na diminuição do atrito. Essa relação ocorre porque, com um tempo de relaxamento relativamente longo, a energia elástica gerada nas regiões próximas às paredes do duto é transportada para a camada de amortecimento e para a região logarítmica do escoamento. Esse transporte contribui significativamente para a redução do arrasto, ao alterar as características da turbulência nessas zonas críticas.

Ainda na investigação dos efeitos elásticos, Baik et al. (2005), utilizando a técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV), identificaram um comportamento peculiar das cadeias poliméricas ao longo do escoamento. Eles observaram que ocorre uma separação dos filamentos poliméricos, que passam a se comportar de maneira semelhante a corpos sólidos quando interagem com regiões de altas tensões cisalhantes, como aquelas próximas às paredes. Essa separação foi atribuída à interação complexa entre as forças elásticas dos polímeros e as forças inerciais geradas pelo fluido turbulento. À medida que as cadeias poliméricas são esticadas pelas flutuações de velocidade, elas se fragmentam em filamentos mais finos devido às tensões alongadas, o que modifica a dinâmica do escoamento. Além disso, o estudo apontou que uma injeção heterogênea de polímeros no escoamento pode aumentar a eficiência na redução de atrito. Essa estratégia permite que os polímeros interajam de maneira otimizada com as regiões de maior tensão cisalhante, maximizando o impacto na supressão da turbulência e na redistribuição de energia cinética.

A compreensão da turbulência é crucial para explorar os efeitos dos polímeros na redução de atrito, especialmente em escoamentos altamente turbulentos, onde os benefícios proporcionados por esses aditivos se tornam mais evidentes. Polímeros interagem diretamente com as estruturas turbulentas, suprimindo flutuações e vórtices, o que resulta em uma diminuição significativa do atrito. No entanto, para maximizar a eficácia desses aditivos em aplicações práticas, é essencial uma abordagem otimizada dos parâmetros dos polímeros, bem como uma compreensão detalhada da dinâmica turbulenta.

Embora seja possível identificar a ocorrência de turbulência, prever seu comportamento com precisão ainda representa um desafio significativo. A turbulência é um fenômeno altamente complexo, caracterizado por flutuações irregulares e aparentemente aleatórias em variáveis do fluido, como velocidade, temperatura e outros escalares. Essas flutuações instantâneas dificultam o estudo de

fenômenos de transporte, como o de quantidade de movimento, energia, calor e massa, tornando sua análise particularmente desafiadora. Em geral, a definição precisa de turbulência está vinculada à análise de suas propriedades estatísticas, já que as variáveis instantâneas exibem comportamento caótico e imprevisível.

A teoria seminal proposta por Kolmogorov (1941) e apresentada no projeto de graduação de Ian Consenza (2018) oferece uma estrutura importante para descrever o comportamento do escoamento turbulento. Segundo Kolmogorov, o campo turbulento pode ser representado como uma cadeia de vórtices de diferentes tamanhos, onde a energia é introduzida em grandes escalas e transferida para as menores por meio de um processo de cascata. Nesse modelo, as grandes estruturas turbulentas se fragmentam em vórtices menores, que, por sua vez, continuam a se dividir até que a energia cinética é finalmente dissipada pela ação da viscosidade em escalas muito pequenas. Esse processo, conhecido como a cascata de energia de Kolmogorov, fornece a base para entender como a energia turbulenta é redistribuída no escoamento.

A introdução de polímeros nesses sistemas afeta diretamente essa cascata de energia. Ao alongar as cadeias poliméricas nas pequenas escalas, os polímeros interferem na dissipação de energia, alterando as interações entre os vórtices e, conseqüentemente, modificando o comportamento geral da turbulência. Essa interferência é essencial para explicar os mecanismos por trás da redução de atrito.

A Figura 2 ilustra a relação entre os vórtices (ou turbilhões) e os efeitos da viscosidade em escoamentos turbulentos. Pequenos vórtices dissipam energia cinética devido à ação da viscosidade, embora possuam uma energia cinética individualmente reduzida. No entanto, esses vórtices menores são constantemente reenergizados pela transferência de quantidade de movimento proveniente de estruturas turbulentas maiores, o que mantém ativa a cascata de energia descrita por Kolmogorov. Essa interação é fundamental para o comportamento dinâmico da turbulência.

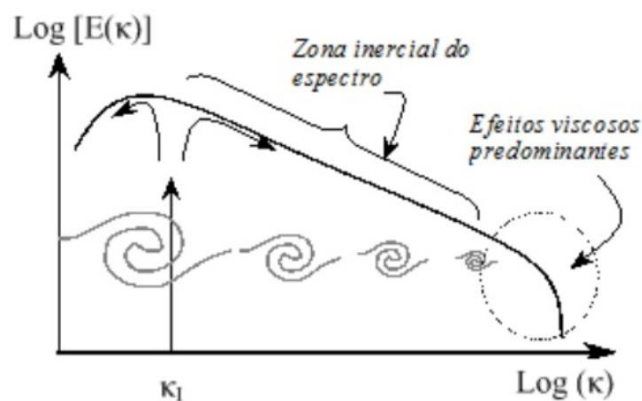


Figura 2: Espectro Energia Cinética Turbulenta em função do número de onda (Pope, 2000).

A explicação fenomenológica de Virk (1975) e apresentada no projeto de graduação de Ian Consenza (2018), fornece uma perspectiva importante sobre os limites máximos de redução de atrito em escoamentos turbulentos com adição de polímeros. Segundo Virk, esses limites são determinados pela expansão da camada intermediária na camada limite turbulenta. A teoria sugere que a redução máxima do atrito ocorre quando os polímeros influenciam todas as regiões do escoamento, especialmente a camada intermediária, provocando uma modificação significativa na estrutura turbulenta e na distribuição de energia entre as diferentes escalas. Esse efeito é especialmente relevante para compreender os fatores que limitam a eficiência dos polímeros em contextos práticos.

Além disso, Prandtl-Kármán é amplamente utilizado como uma ferramenta analítica para visualizar e compreender os fenômenos de redução de atrito em escoamentos turbulentos com polímeros. Esse gráfico permite identificar:

- O início da redução de atrito com a introdução dos polímeros no escoamento.
- O aumento na eficiência da redução de atrito, que cresce à medida que a concentração de polímeros na solução aumenta.
- O ponto de saturação, onde a redução de atrito atinge um limite máximo, independentemente do aumento adicional na concentração de polímeros.

A Figura 3 destaca essa dinâmica, mostrando como a eficiência da redução de atrito evolui desde o início da adição de polímeros até o ponto em que a redução se estabiliza. Esse comportamento reflete a interação complexa entre as propriedades do fluido, as características dos polímeros, e as condições do escoamento,

forneendo subsídios valiosos para a aplicação otimizada desses aditivos em sistemas reais.

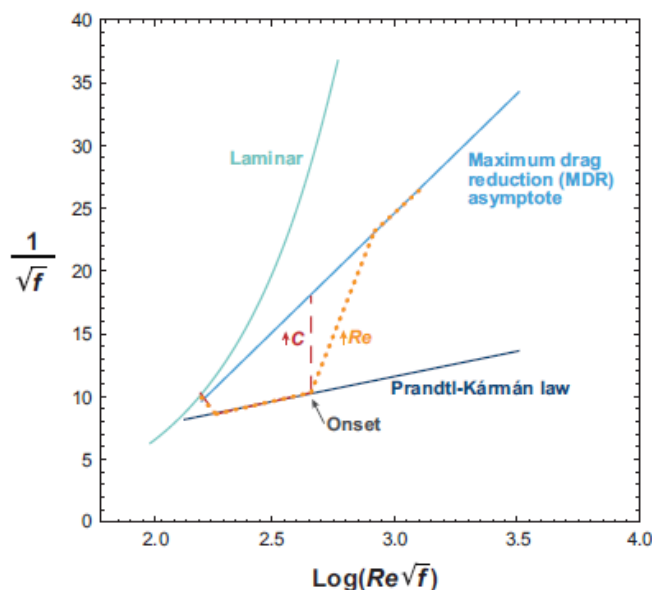


Figura 3: Representação das diferentes trajetórias do polímero redutor de atrito (White e Mungal, 2008).

A Figura 3 destaca a máxima redução de arrasto (MDR), um conceito fundamental posteriormente denominado de Lei de Virk ou assíntota de Virk, em homenagem ao pesquisador. Essa assíntota representa o limite máximo teórico de redução de atrito que pode ser alcançado em escoamentos turbulentos com a adição de polímeros. Esse ponto de saturação ocorre quando, para um número de Reynolds fixo, o aumento na concentração de polímeros não resulta em uma diminuição adicional significativa do arrasto.

Dubief et al. (2004) propuseram um modelo avançado para descrever como moléculas de polímeros flexíveis interagem com estruturas turbulentas. De acordo com sua teoria, as macromoléculas operam de maneira cíclica e organizada, absorvendo energia dos vórtices e devolvendo-a ao escoamento principal. Esse modelo baseia-se em três etapas principais:

1. Alongamento das moléculas poliméricas: Na subcamada de transição, as moléculas são forçadas a girar em torno dos vórtices, estendendo-se ao longo do fluxo turbulento. Durante essa fase, as macromoléculas capturam as flutuações que alimentam os vórtices.
2. Transferência de energia: Após o alongamento, as moléculas migram em direção à subcamada viscosa, onde passam a se contrair. Durante essa

contração, a energia armazenada é devolvida ao escoamento principal na forma de movimento organizado.

3. Ciclo contínuo: Esse processo de absorção e liberação de energia se repete inúmeras vezes, permitindo uma interação constante e eficiente entre as moléculas de polímero e a estrutura turbulenta do escoamento.

Esse modelo explica como os polímeros podem atuar como mediadores no transporte de energia, modulando a turbulência e contribuindo para a redução de atrito de maneira dinâmica. A abordagem proposta por Dubief et al. (2004) oferece novas perspectivas sobre a interação fluido-polímero, com implicações significativas para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes em engenharia de escoamentos.

Adicionalmente, Fruteau et al. (2024) complementam essas observações ao explorar a aplicação de agentes redutores de arrasto (DRAs) em sistemas multifásicos. Em suas simulações e testes de campo, verificaram que os DRAs promovem uma redução significativa na queda de pressão em tubulações, sendo essa eficiência diretamente relacionada à diminuição do atrito causado pelas flutuações turbulentas. Seus estudos demonstraram que a eficiência dos DRAs segue um comportamento similar ao descrito pela assíntota de Virk, destacando que fatores como a taxa de cisalhamento, a interação interfacial entre fases e a composição do fluido influenciam diretamente no limite de eficiência dos polímeros.

Por fim, os dados de Fruteau et al. (2024) reforçam a importância de abordagens detalhadas de modelagem para prever o comportamento do escoamento e otimizar a aplicação de polímeros, garantindo que a eficiência seja mantida ao longo do tempo em aplicações práticas. Esses “insights” conectam as teorias clássicas, como a Lei de Virk, com as soluções práticas em sistemas industriais complexos.

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. Merrill e Horn (1984), utilizando técnicas de Cromatografia de Permeação em Gel (GPC), investigaram esse mecanismo e descobriram que as cisões nas cadeias poliméricas ocorrem predominantemente

próximas ao ponto médio das macromoléculas. Os autores sugerem que essa degradação acontece especialmente quando as cadeias estão esticadas e alinhadas com o fluxo do escoamento.

Essa dinâmica é confirmada por experimentos realizados por Choi et al. (2000), Nakken et al. (2001), Vanapalli et al. (2005) e Pereira e Soares (2012), que demonstraram que, mantendo-se fixo o número de Reynolds do escoamento, a redução de arrasto atinge um regime permanente após um período inicial de intensa degradação. Isso indica que os polímeros, mesmo após perderem parte de suas cadeias devido à degradação, ainda mantêm um nível residual de eficiência na redução do atrito.

Adicionalmente, Fruteau et al. (2024) destacaram a relevância desse fenômeno em sistemas multifásicos, onde as condições do escoamento, como altas taxas de cisalhamento e as interações entre fases gasosa, líquida e oleosa, potencializam o desgaste dos polímeros. Eles também enfatizaram que a avaliação da eficiência dos agentes redutores de arrasto (DRAs) nesses sistemas é particularmente desafiadora, devido às interações complexas e às variações no regime de fluxo. Esses fatores podem ser subestimados sem o uso de tecnologias avançadas de modelagem, essenciais para prever e mitigar os impactos dessa degradação.

Portanto, enquanto os estudos de Merrill e Horn (1984) e outros autores focam na degradação molecular em condições controladas, Fruteau et al. (2024) expandem essa visão para condições mais complexas de sistemas multifásicos, reforçando a necessidade de abordagens inovadoras para maximizar a eficiência dos polímeros ao longo do tempo.

A Figura 4 ilustra essa variação temporal na eficiência das soluções poliméricas para redução de atrito em escoamentos turbulentos. O gráfico mostra que, em um primeiro momento, a eficiência diminui rapidamente devido à degradação molecular. Entretanto, após um período de estabilização, observa-se um patamar constante na eficácia da redução de atrito, evidenciando o equilíbrio entre a degradação das cadeias poliméricas e a capacidade residual do polímero de modificar a turbulência.

Esses achados são cruciais para aplicações práticas, pois permitem prever a durabilidade dos polímeros em sistemas industriais, possibilitando ajustes na concentração e reposição dos aditivos para manter a eficiência desejada.

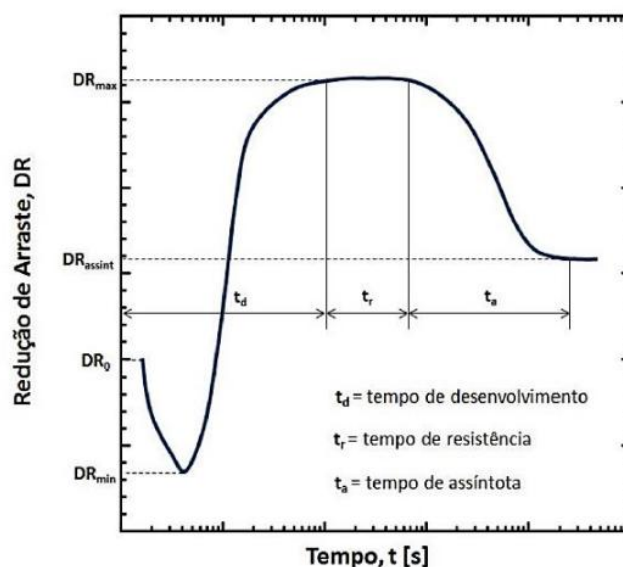


Figura 4: Eficiência do polímero em função do tempo (Pereira e Soares, 2012).

Outro estudo fundamental para a compreensão deste estudo é representado pelos resultados obtidos por White (1969) e Ito (1967), cujos trabalhos forneceram bases teóricas importantes para a análise da dinâmica de fluidos em escoamentos turbulentos com redução de arrasto por aditivos poliméricos. Ambos os pesquisadores utilizaram um aparato de roda, semelhante ao modelo empregado neste estudo, para investigar os efeitos das forças de cisalhamento e das condições de escoamento sobre as propriedades dos polímeros.

Os experimentos realizados por White e Ito destacaram a complexidade inerente ao fenômeno da redução de atrito promovida por polímeros. Seus resultados ressaltaram que a eficácia dos aditivos está intimamente relacionada a uma série de fatores, entre os quais se destacam:

1. Distribuição molecular dos polímeros: A uniformidade e o peso molecular médio desempenham papéis críticos na interação com as estruturas turbulentas.
2. Interações dinâmicas: A relação entre as tensões de Reynolds e as tensões flutuantes induzidas pelos polímeros é determinante para a supressão de flutuações turbulentas e a modificação da cascata de energia.
3. Condições do escoamento: Variáveis como o número de Reynolds, o perfil de velocidade e as características geométricas do duto influenciam diretamente a eficiência do polímero.

Essas análises avançadas reforçam a ideia de que a redução de atrito em escoamentos turbulentos é um fenômeno multifatorial, exigindo uma abordagem abrangente e detalhada. A interação das cadeias poliméricas com o fluido base e as estruturas turbulentas cria um comportamento altamente dinâmico, onde pequenas mudanças nas características moleculares dos polímeros podem levar a variações significativas na eficácia.

Diversos polímeros têm sido amplamente investigados como agentes redutores de atrito em escoamentos turbulentos em dutos circulares. Entre os mais comuns estão a poliacrilamida (PAM), o polietileno óxido (PEO) e o poliisobutileno (PIB). Esses polímeros são preferidos devido à sua alta solubilidade em água e à capacidade de formar soluções viscosas que atuam eficazmente na redução da turbulência, conforme demonstrado por Dimitropoulos et al. (2005).

Estudos experimentais desempenharam um papel crucial no entendimento da eficiência desses polímeros. Por exemplo, os trabalhos clássicos de Virk (1975) e Escudier et al. (1999) mostraram a relação direta entre a concentração de polímeros e a magnitude da redução de atrito. Esses estudos revelaram que, dentro de certos limites, o aumento da concentração de polímeros em solução leva a uma maior redução de atrito, até alcançar um ponto de saturação, conhecido como a máxima redução de arrasto (MDR).

Aplicações práticas em indústrias como oleodutos e gasodutos reforçam os benefícios dos polímeros na redução de atrito. A adição de polímeros a fluidos de transporte reduz significativamente a diferença de pressão necessária para o escoamento, proporcionando economias substanciais de energia. Por exemplo, Sellin et al. (1982) destacaram que a eficiência energética pode ser dramaticamente melhorada em sistemas industriais, reduzindo custos operacionais em larga escala.

Entretanto, apesar desses benefícios, o uso de polímeros enfrenta desafios significativos. Um dos principais problemas é a degradação das cadeias poliméricas causada por altas taxas de cisalhamento e interações químicas com o fluido, o que reduz sua eficácia ao longo do tempo. Além disso, questões ambientais e econômicas relacionadas à recuperação e reciclagem dos polímeros também são preocupações relevantes. Segundo White e Mungal (2008), esses aspectos representam obstáculos que devem ser resolvidos para a aplicação sustentável dos polímeros em sistemas industriais.

3.

Metodologia Experimental

Neste trabalho, o estudo sobre a redução de atrito promovida pela adição de polímeros ao fluido foi realizado utilizando uma seção de testes composta por um tubo configurado em um “loop” circular fechado. Esse equipamento, conhecido como Roda, foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Fluidos (LEF) da PUC-Rio em 2018 por um aluno como parte de um projeto de pesquisa financiado pelo CENPES/Petrobras. Um pedido de patente foi submetido para proteger essa inovação.

A principal vantagem da utilização da Roda no estudo de agentes redutores de atrito reside na pequena quantidade de produto necessária para os ensaios. Em testes convencionais, o fluido de trabalho contendo o aditivo é forçado a escoar por longos dutos em forma de loop, o que exige volumes significativos de fluido e aditivo. Além disso, nesses sistemas, bombas hidráulicas são empregadas para movimentar o fluido, acelerando o processo de degradação dos polímeros redutores de atrito. O dispositivo da Roda, por sua vez, elimina o uso de bombas, permitindo que a degradação seja exclusivamente atribuída à interação do fluido com a parede do tubo, isolando este efeito para análise.

A seguir, são apresentadas as características da seção de testes disponível no LEF, bem como as modificações realizadas no âmbito deste trabalho para otimizar o sistema e atender às necessidades da pesquisa.

3.1.

Teoria da dinâmica funcional da roda

A seguir, observa-se um esquema ilustrativo que facilita a compreensão do funcionamento da roda, ilustrado pela Figura 5. Nesse sistema, um tubo com diâmetro D é conformado em um círculo de raio R , o qual gira ao redor de um eixo central horizontal com velocidade angular ω , impulsionado por um motor elétrico. O fluido a ser analisado é introduzido pela porta C, preenchendo a área hachurada mostrada na figura. A rotação da roda gera um desnível H entre as superfícies livres do fluido. O torque aplicado ao eixo do motor, que corresponde ao torque gerado

pela tensão de cisalhamento exercida pelo fluido nas paredes internas do tubo, pode ser medido utilizando um torquímetro.

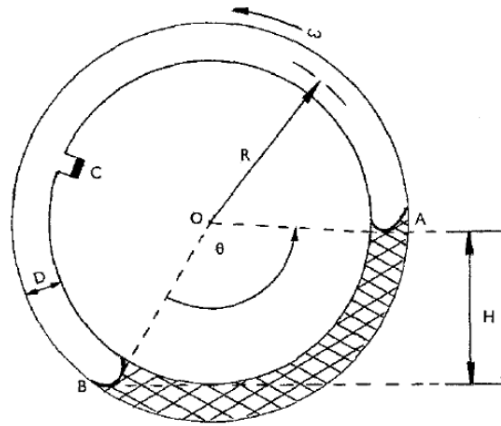


Figura 5: Representação esquemática ilustrando o princípio de funcionamento da roda, utilizada para medir o atrito do fluido em contato com as paredes do tubo (White e Bond, 1971).

Com o esquema apresentado na figura anterior, e conforme elucidado por White e Bond (1971), um método de cálculo experimental para o coeficiente de atrito relacionado ao escoamento é demonstrado a seguir:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2} \quad (3.1)$$

onde τ_w representa a tensão cisalhante na parede, ρ é a massa específica do fluido, e $\bar{u}$ corresponde à velocidade média na seção transversal do tubo. Assim, o coeficiente de atrito de Fanning pode ser associado aos parâmetros da roda por meio da Equação 3.2:

$$C_f = \frac{DHg}{2\theta R^3\omega^2} \quad (3.2)$$

onde g é a aceleração da gravidade, T é o torque medido na RODA, R é o raio da RODA, e V corresponde ao volume de líquido inserido na RODA e ω é a velocidade angular da RODA. Os demais parâmetros estão descritos na Figura 5.

No caso em que o torque é medido diretamente, como realizado neste estudo, não é necessário determinar a altura H . O coeficiente de atrito de Fanning pode, então, ser calculado diretamente utilizando a seguinte expressão:

$$C_f = \frac{TD}{2\rho\omega^2 R^3 V} \quad (3.3)$$

Vale destacar que o coeficiente de atrito de Fanning é equivalente a quatro vezes o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach, f , o qual é definido pela seguinte relação:

$$f = \frac{2\Delta p D}{\rho L \bar{u}^2} \quad (3.4)$$

onde Δp representa a queda de pressão ao longo de um tubo de comprimento L e diâmetro D .

3.2.

Aparato experimental da roda

Para o desenvolvimento do projeto, foi utilizada uma seção de testes para a roda, localizadas no LEF, cuja representação esquemática é apresentada na Figura 6.

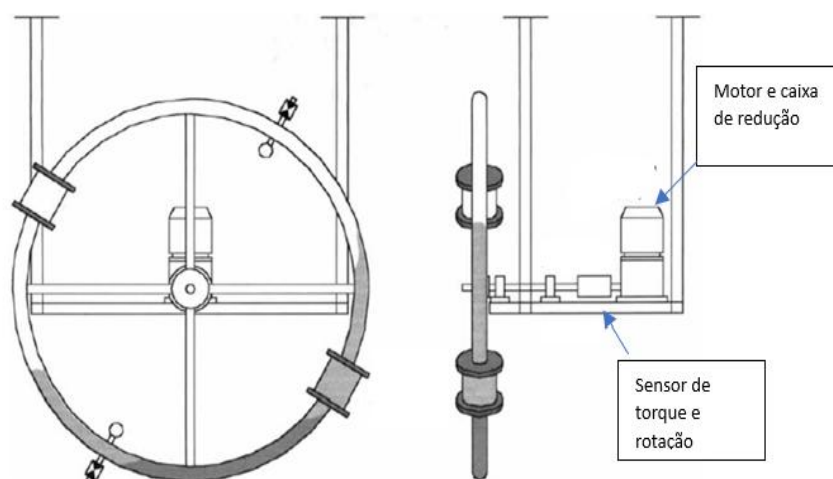


Figura 6: Representação esquemática da seção de testes desenvolvida em 2018.

Fonte: LEF, 2018.

A bancada experimental foi construída utilizando cinco tubos de acrílico com diâmetro interno de 26 mm, curvados em formato de arcos de círculo e conectados nas extremidades por luvas. Quando unidos, os arcos formam um círculo com diâmetro total de 750 mm. Para sustentar a tubulação, foi desenvolvido um suporte composto por duas peças centrais de alumínio acopladas, conectadas a cinco hastes radiais também de alumínio. Cada haste radial possui uma extensão interna ajustável, permitindo um alinhamento mais preciso da tubulação em relação ao eixo radial.

Para gerar o torque necessário à operação da RODA, foi instalado um motor elétrico de corrente contínua de 24 V. Esse motor, projetado para acionar limpadores de para-brisas de caminhões, destaca-se pela sua confiabilidade. Ele foi acoplado a uma caixa de redução composta por coroa e pinhão, permitindo o controle da velocidade de rotação do aro e, conseqüentemente, do escoamento do fluido.

O eixo horizontal, conectando a RODA à caixa de redução, foi apoiado em mancais de rolamento montados em bases ajustáveis para garantir o perfeito alinhamento do sistema. Acoplamentos flexíveis foram utilizados para simplificar o processo de alinhamento preciso dos eixos. Entre a caixa de redução e a roda, foi instalado um sensor de torque da marca Omega, modelo TQ513-030-EN1024, que também mede a rotação do eixo por meio de um encoder.

Para manter uma velocidade de rotação constante durante os testes, foi projetado um controlador de malha fechada baseado em arquitetura Arduino. O controle foi complementado com sistemas de amplificação de sinais de baixo ruído, alimentados por baterias, garantindo a precisão no ajuste da velocidade da roda.

A estabilidade estrutural do aparato foi uma prioridade para evitar que vibrações provenientes de excentricidades ou desbalanceamentos que interferissem no comportamento do escoamento e nos resultados experimentais. Para isso, uma estrutura cúbica, construída com perfis do tipo Bosch®, foi montada, fixando a roda em uma das arestas superiores para maximizar a rigidez e a estabilidade do conjunto.

O desempenho satisfatório da RODA foi confirmado por diversos testes realizados ao longo do projeto dedicado ao estudo de redutores de atrito, conduzido em parceria com a Petrobras. No entanto, o sensor de torque e rotação da Omega, utilizado no projeto, apresentou problemas na medição do torque. Dado que o reparo não foi viável e o custo do sensor era elevado, optou-se por reprojeter o

dispositivo da RODA para incorporar um sensor de torque mais acessível. A seguir, é descrito o novo projeto concebido e implementado neste trabalho.

O sensor de medição de rotação da Omega permaneceu funcional, sendo utilizado exclusivamente para medir a rotação no novo sistema. Por outro lado, o sensor de torque danificado foi substituído pelo modelo HTNJ501-01-5NM, escolhido por sua confiabilidade, baixo custo e resolução de 0,1%, com fundo de escala de 5 *N.m*.

Este novo sensor de torque possui uma geometria que exige a passagem do eixo por seu interior, o que demandou um reprojetado do acoplamento entre o motor e o eixo da Roda, conforme ilustrado nas Figuras 7 e 8. O projeto manteve a montagem original do sensor de rotação da Omega, que continua operando no eixo, mas apenas como medidor de rotação.

Para acomodar o novo sensor de torque, uma placa de alumínio com um orifício central para a passagem do eixo foi fixada verticalmente à base da mesa. O sensor foi montado nessa placa, permitindo que o eixo passasse por seu interior. Uma extensão do eixo com acoplamento flexível foi adicionada para adaptar o sistema ao novo sensor. A outra extremidade do sensor de torque foi conectada a uma segunda placa de alumínio, também vertical, com um furo central para permitir a passagem da ponta do eixo. Essa segunda placa foi montada em balanço.

O conjunto do motor e da caixa de redução foi acoplado ao eixo e fixado à placa em balanço. Durante a operação, o torque gerado pelo motor é transmitido pela placa em balanço para o sensor de torque, que sofre torção e indica o valor medido.

Dessa forma, observam-se nas Figuras 9 e 10 as visões frontal e superior do experimento.

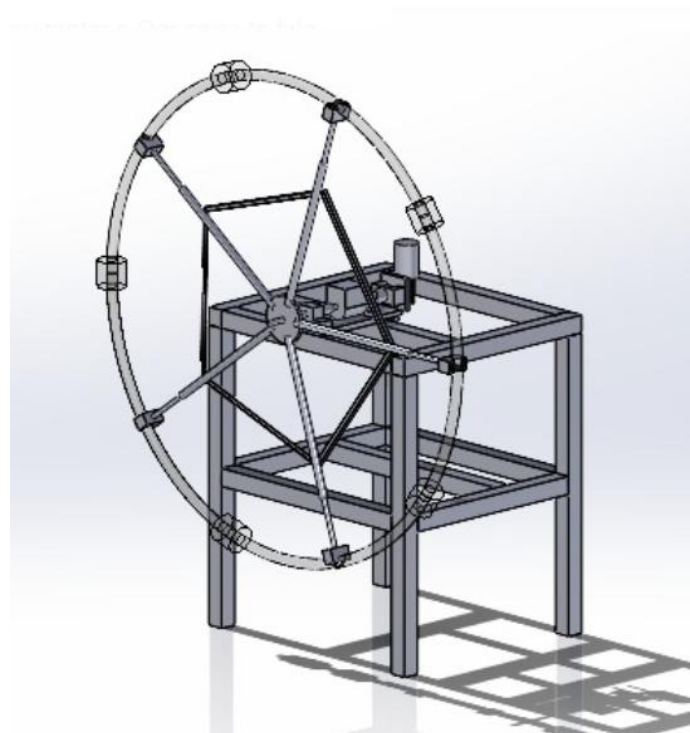


Figura 7: Aparato experimental atual. (Fonte: Laboratório de Engenharia de Fluidos)

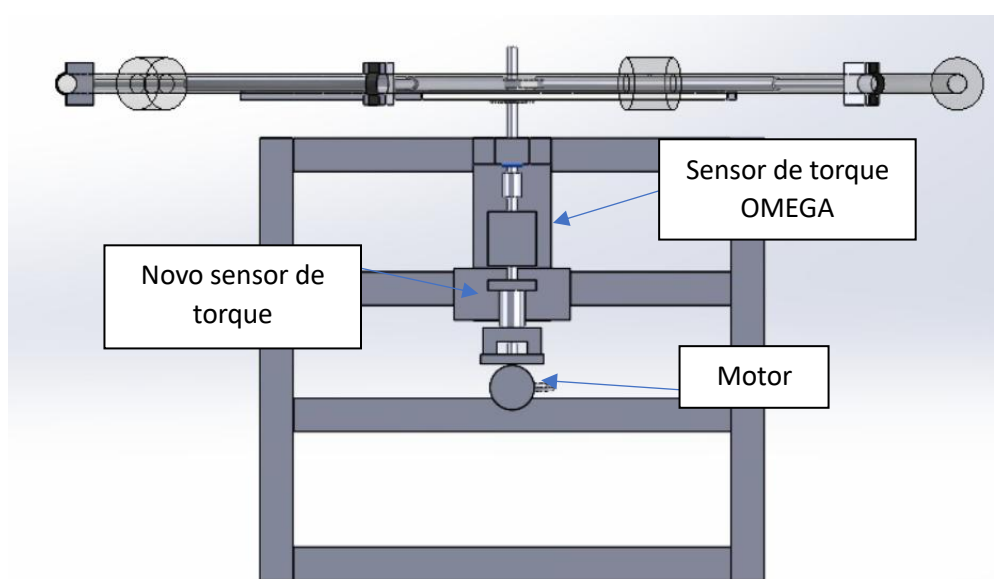


Figura 8: Vista superior do aparato experimental. (Fonte: Laboratório de Engenharia de Fluidos)

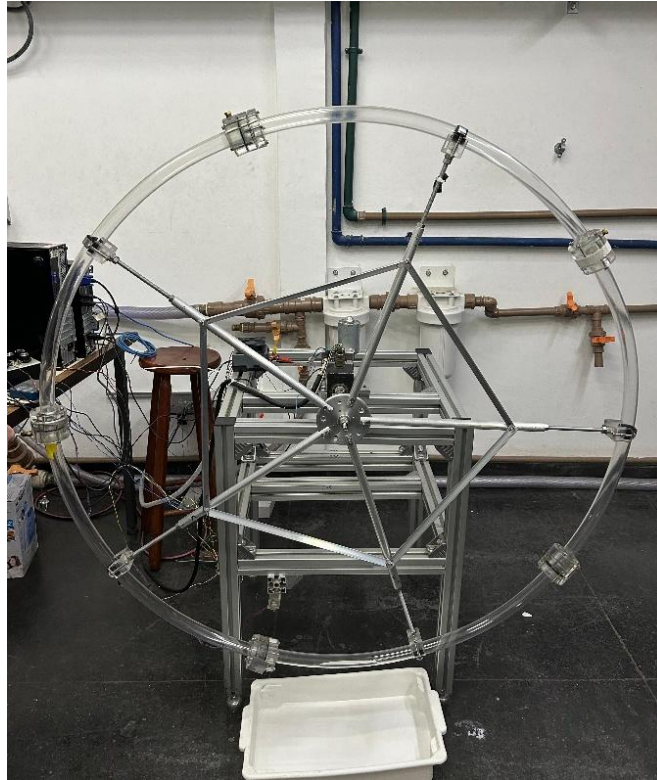


Figura 9: Fotografia com visão frontal do experimento.

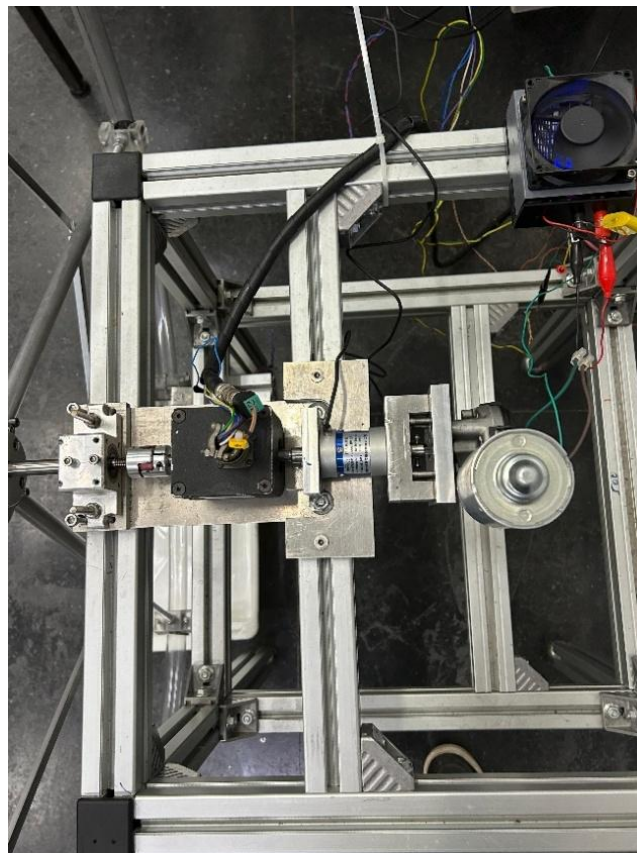


Figura 10: Fotografia com visão superior do experimento.

3.3.

Procedimento Experimental

Anteriormente ao teste com os redutores de atrito, o procedimento experimental envolve 3 etapas preliminares, sendo elas: calibração estática do medidor de torque, calibração dinâmica da roda e preparação dos fluidos. Cada uma dessas etapas é detalhada a seguir.

3.3.1.

Calibração estática do medidor de torque

Antes de cada ensaio, o medidor de torque era submetido a uma calibração estática, utilizando massas conhecidas fixadas em um parafuso específico na parte externa da roda, conforme ilustrado na Figura 11. A aplicação de diferentes massas permitia construir uma curva de calibração que correlacionava a tensão de saída do medidor de torque com o torque aplicado.



Figura 11: Processo de calibração estática do medidor de torque utilizando massas fixadas à roda.

Na Figura 12 é ilustrado o princípio básico de calibração de um sensor de torque usando uma roda e um peso conhecido. A calibração é baseada na fórmula do torque.

$$T = R m g \quad (3.5)$$

- T é o torque gerado.
- R é o raio da roda, representado pela reta horizontal no diagrama.
- mg é a força peso do objeto, sendo m a massa e g a aceleração gravitacional (aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$)

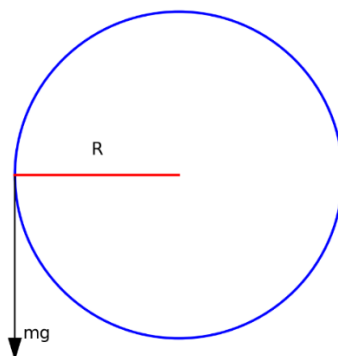


Figura 12: Princípio básico de calibração do sensor de torque.

Foram registradas diferentes voltagens correspondentes a diferentes massas durante a calibração. Esse procedimento foi repetido antes de todos os experimentos para assegurar a repetibilidade dos resultados. Na Figura 13 observa-se um exemplo de uma das curvas de calibração. A partir do ensaio de calibração, foram determinados ajustes lineares que estabelecem a relação entre o torque T , medido em Nm , e a tensão V , expressa em volts.

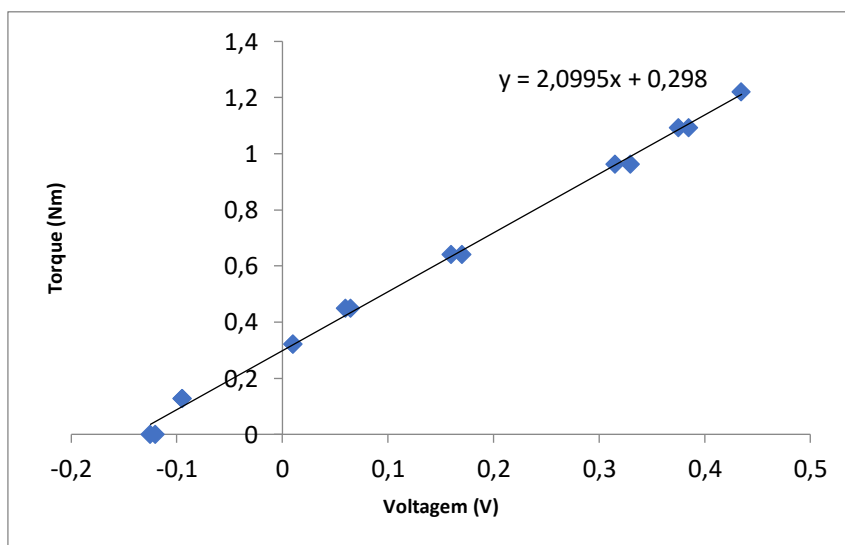


Figura 13: Curva de calibração apresentando a relação entre Torque e Tensão.

3.3.2.

Calibração dinâmica da roda

Após a calibração estática, a roda era acionada sem a presença do fluido. Essa calibração dinâmica com a roda vazia tinha como objetivo medir os torques resultantes do atrito mecânico nos mancais e acoplamentos, bem como o torque causado pela resistência do ar no ambiente sobre a roda em movimento. Os valores de torque registrados para cada rotação nesse procedimento eram posteriormente subtraídos dos torques medidos nos ensaios com o fluido dentro da roda, isolando, assim, o torque originado exclusivamente pela interação da tensão cisalhante do fluido com as paredes do tubo da roda.

Contudo, a configuração disponível da roda apresentou algumas restrições aos testes. A redução do atrito só ocorre em escoamentos no regime turbulento, exigindo a escolha de uma velocidade de rotação que assegure essa condição. Além disso, havia um limite máximo de rotação, acima do qual o fluido era arrastado pela roda, inviabilizando os ensaios.

Levando em conta essas limitações e após a realização de testes preliminares, decidiu-se por conduzir os ensaios a uma velocidade fixa de $1,8 \text{ m/s}$.

3.3.3.

Preparação dos fluidos

Os testes realizados neste estudo concentraram-se na análise do redutor de atrito poli-isobuteno, comercialmente disponível sob o nome Liovac. Essa formulação é fornecida com uma concentração de 1,5% em volume. Sua massa específica é de 747 kg/m^3 .

O fluido utilizado nos experimentos foi o hidrocarboneto Dodecano (C_{12}). Para fins comparativos, foram avaliados tanto o C_{12} puro quanto soluções contendo poli-isobuteno em concentrações de 100, 80, 60 e 40 ppm. As propriedades físicas do C_{12} à temperatura de 20°C são: massa específica de 753 kg/m^3 e viscosidade de $1,34 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

A preparação desses fluidos foi realizada por meio da pesagem das quantidades necessárias de C_{12} e Liovac para atingir as concentrações desejadas. Para as pesagens, utilizou-se uma balança Gehaka AG 200, com resolução de 10^{-4} gramas.

3.3.4.

Testes com fluidos

Os fluidos foram introduzidos na seção de testes de acordo com os procedimentos relatados em sequência. Inicialmente, o fluido puro, sem redutor de atrito, era introduzido na roda por meio da porta localizada em um dos flanges de acoplamento. O volume de C_{12} considerado adequado para os testes foi de 400 mL. A velocidade de rotação desejada para o teste era ajustada no controlador da roda, 1,8 m/s, velocidade padrão utilizada. Após o acionamento, aguardava-se o tempo necessário para que a rotação alcançasse e estabilizasse o valor definido. Somente então o sistema de aquisição de dados era ativado, registrando as medições de torque e rotação para a análise.

Nos experimentos com o fluido puro, sem adição de redutor de atrito, o torque e a rotação permaneciam praticamente constantes ao longo do ensaio, uma vez que não havia variação na tensão cisalhante do fluido sobre a parede do tubo, dado que a temperatura era mantida constante. Esses testes eram, portanto, relativamente curtos, com duração média de 10 minutos. Os valores de torque registrados nesses experimentos serviam como referência para comparação com os resultados obtidos quando o redutor de atrito era adicionado ao fluido.

Após a conclusão do teste com o fluido puro, o líquido era drenado da roda. Em seguida, 400 mL do fluido contendo a concentração desejada de redutor de atrito era introduzido na roda. A roda era então acionada para atingir a velocidade de rotação predefinida, e o tempo necessário para a estabilização do torque era respeitado. Uma vez estabilizado, o sistema de aquisição de dados era ativado para registrar as medições.

Os testes com fluido contendo redutor de atrito tinham duração média de 3 horas, visto que esse intervalo de tempo é o suficiente para avaliar a degradação dos redutores de atrito causada pelo cisalhamento na parede do tubo e pela turbulência do escoamento.

4.

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados sobre a validação da seção de testes na forma de roda, tal como do procedimento experimental utilizado. Posteriormente, será avaliado o efeito do poli-isobuteno, na sua forma comercial, Liovac, diluído em C₁₂.

4.1.

Testes de validação da Roda

Os testes de verificação da roda e da metodologia experimental proposta foram conduzidos por meio da determinação dos fatores de atrito para o fluido C₁₂ sem a adição de redutor de atrito. Os resultados obtidos foram comparados com correlações disponíveis na literatura para fator de atrito.

As correlações para fator de atrito em escoamentos turbulentos em dutos de seção circular com curvatura, propostas por White (1969) e Ito (1967), foram utilizadas, conforme recomendado por White e Bond (1971). Essas correlações estão descritas a seguir.

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

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

Nas correlações mencionadas, o número de Reynolds é calculado com base no diâmetro do tubo e na velocidade tangencial de rotação da roda.

$$Re = \frac{\rho\omega RD}{\mu} \quad (4.3)$$

A Tabela 1 apresenta a velocidade regulada, a média da velocidade aferida e o torque médio obtido a partir da média do resultado de todos os testes realizados utilizando-se C₁₂ como fluido. Observa-se que o desvio padrão das médias dos torques em (N.m) foi de 7%.

Tabela 1: Resultados dos testes de validação da roda operando com C₁₂

Velocidade Regulada (m/s)	Média das Velocidades Medidas (m/s)	Torque Médio (Nm)	Desvio padrão (%)	Reynolds (Re)
1,8	1,79	0,87	7%	2,63E+04

Na Figura 14 são apresentados os resultados de 16 testes conduzidos utilizando o C₁₂ puro como fluido de trabalho.

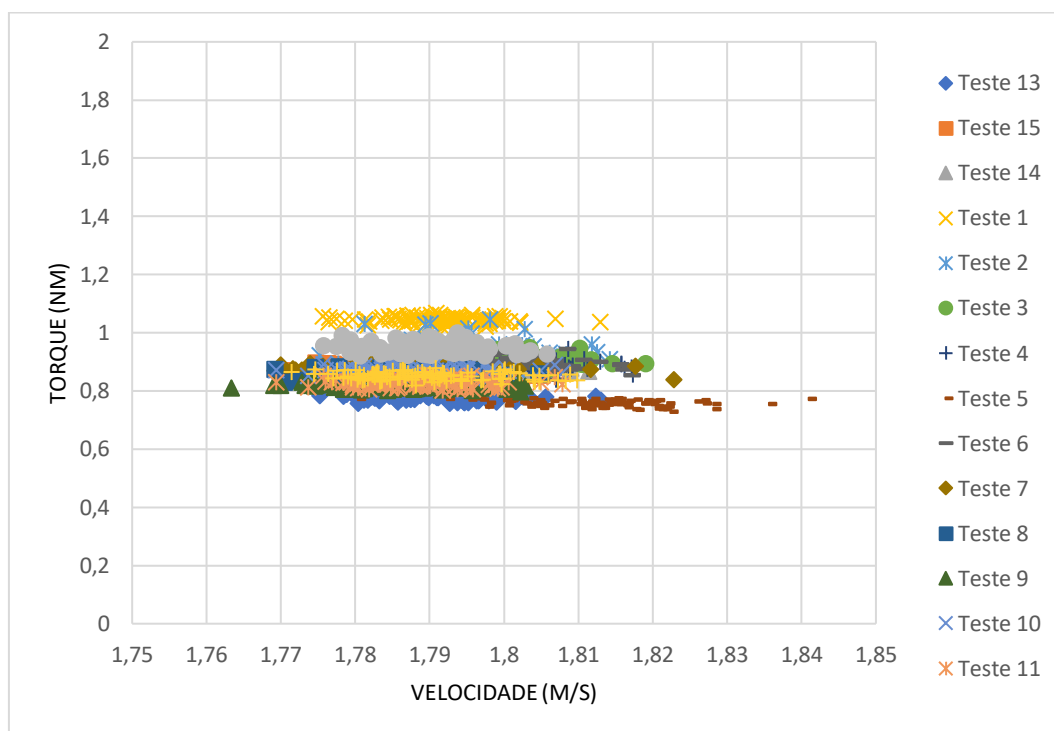


Figura 14: Relação entre torque e velocidade para o C₁₂ puro para os diferentes experimentos conduzidos.

Testes com a roda vazia, conforme descrito na seção de procedimentos experimentais, foram realizados antes de cada medição. Os valores obtidos nesses testes foram subtraídos dos resultados registrados com o líquido presente na roda.

Após a confirmação da incerteza do aparato experimental, foi possível calcular o torque exclusivamente associado ao fluido em escoamento dentro da tubulação. O mesmo, corresponde ao torque causado unicamente pela tensão cisalhante do fluido sobre a parede do tubo. Isto pode ser observado no gráfico referente a Figura 15 que compara os torques obtidos.

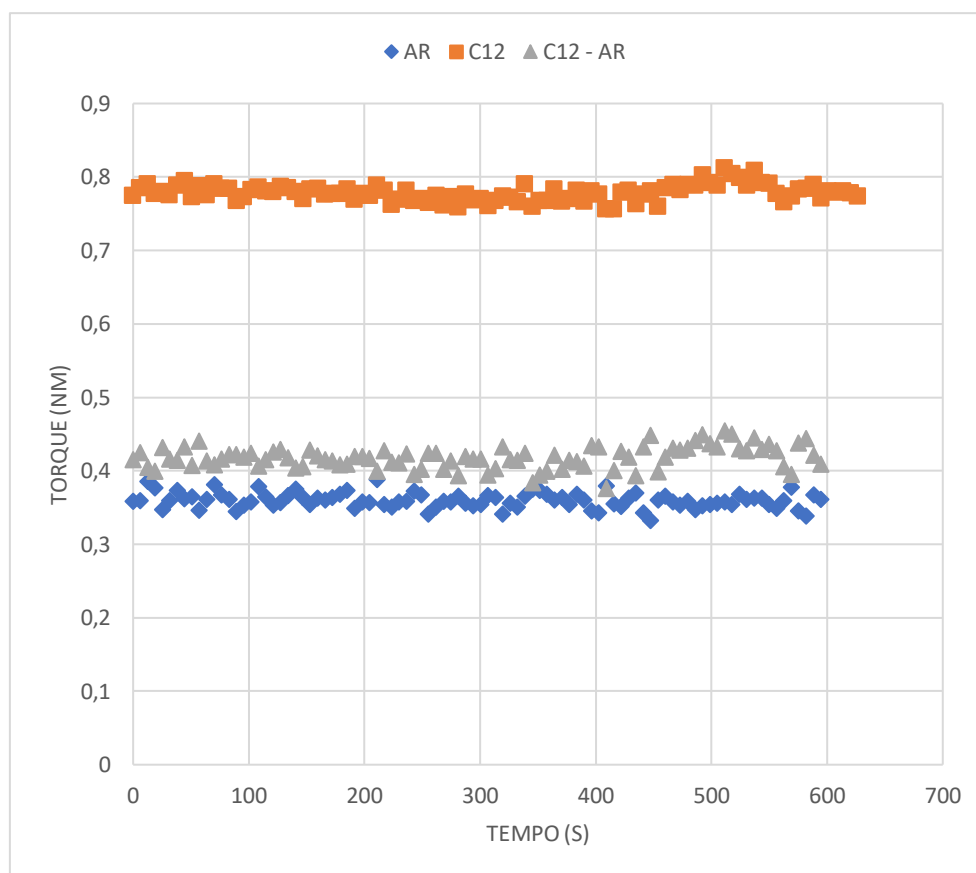


Figura 15: Resultado de um teste da roda operando apenas com ar, com C_{12} e a diferença entre eles.

Neste estágio, é obtido o torque de referência, correspondente ao torque gerado exclusivamente pelo fluido em escoamento. Após cada teste com a solução de C_{12} e polímero, o torque medido no experimento com ar deve ser subtraído para determinar o torque líquido.

Com esses dados, torna-se possível calcular os coeficientes teóricos propostos por White e Ito, além do coeficiente de Fanning experimental. Sendo assim, observa-se na Tabela 2 e na Figura 16 resultados dos testes realizados e seus respectivos valores do coeficiente de Fanning, experimental e Ito, teórico. A partir disso, vale salientar que o desvio padrão do coeficiente de Fanning apresentado foi de 10,38% com 95% de confiabilidade. Foi utilizada uma velocidade padrão de 1,8 (m/s) e um Reynolds fixo de $2,63 \times 10^4$. Dessa forma, o valor de ITO encontrado é fixo, $1,95 \times 10^{-2}$.

Tabela 2: Resultados dos Testes de Verificação da Roda Operando com C₁₂

Teste:	Coef. de Fanning:
1	1,743E-02
2	1,487E-02
3	1,686E-02
4	1,548E-02
5	1,562E-02
6	1,581E-02
7	1,402E-02
8	1,564E-02
9	1,536E-02
10	1,551E-02
11	1,598E-02
12	1,639E-02
13	1,502E-02
14	1,599E-02
15	1,486E-02
16	1,546E-02

No gráfico abaixo, Figura 16, observa-se o coeficiente de atrito experimental de Fanning de todos os testes. Foi encontrado um desvio padrão médio de aproximadamente 20%. Tal diferença pode ser fruto de diversos fatores. São eles, hipóteses simplificadoras do modelo teórico, limitações experimentais, ou até mesmo às condições do experimento. Alguns exemplos são: a incerteza nos instrumentos de medição, a influência na temperatura, a qual era dada como constante no laboratório, mas não foi quantificada. Todavia, mesmo sendo presente essa diferença para o ITO, o experimento é válido para avaliar o efeito do polímero redutor de atrito sobre o C₁₂ puro.

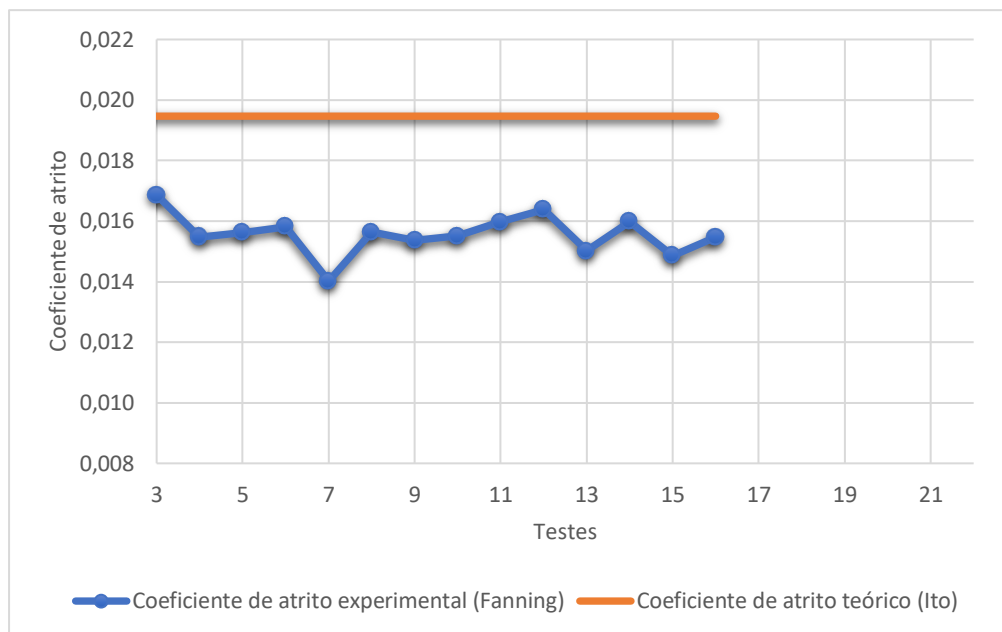


Figura 16: Resultado de todos os testes da roda operando com C_{12} e a diferença entre o coeficiente de atrito de Fanning e Ito

4.2.

Resultados para fluido com redutor de atrito

Nesta seção são apresentados os resultados que constituem o principal objetivo deste estudo: avaliar o desempenho do redutor de atrito em escoamentos turbulentos.

A seguir, são apresentados os resultados da medição do polímero em termos da variação de redução de arrasto (Drag Reduction) ao longo do tempo. Esta é expressa como uma porcentagem, sendo definida como,

$$DR(\%) = 100 \times \frac{(Torque_{C_{12}} - Torque_{polímero})}{Torque_{C_{12}}}$$

As concentrações do agente ativo poli-isobuteno testadas foram de 100, 80, 60 e 40 ppm.

A seguir na Figura 17 vemos a redução de arrasto média para três experimentos em uma concentração de 100 ppm. O desvio padrão médio observado para os dados de diferentes replicações é de 10%. Com essa concentração, pode-se observar uma redução de arrasto inicial é de

aproximadamente 20% e decai em cerca de 160 minutos para um valor nulo, indicando a total degradação do efeito de redução de atrito do polímero.

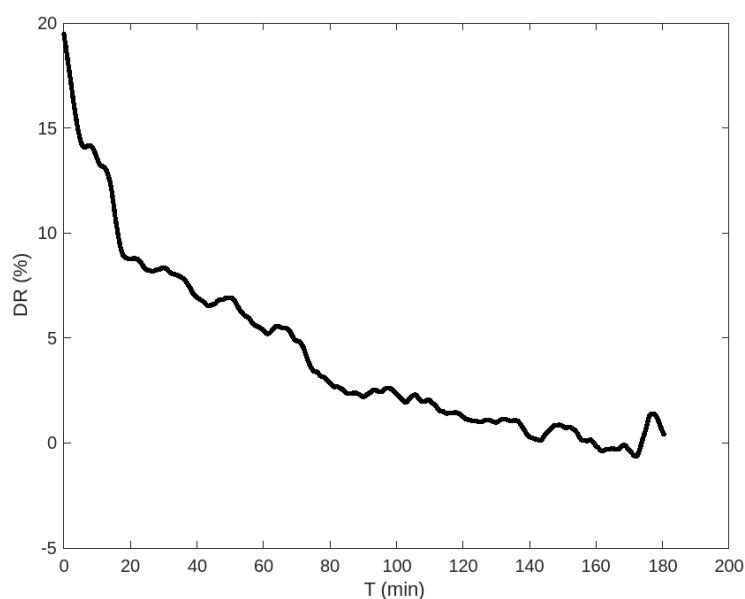


Figura 17: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 100 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C₁₂.

A seguir na Figura 18 vemos a redução de arrasto média para três experimentos em uma concentração de 80 ppm. Com essa concentração, pode-se observar uma redução de arrasto inicial de aproximadamente 13% e uma degradação total em cerca de 160 minutos

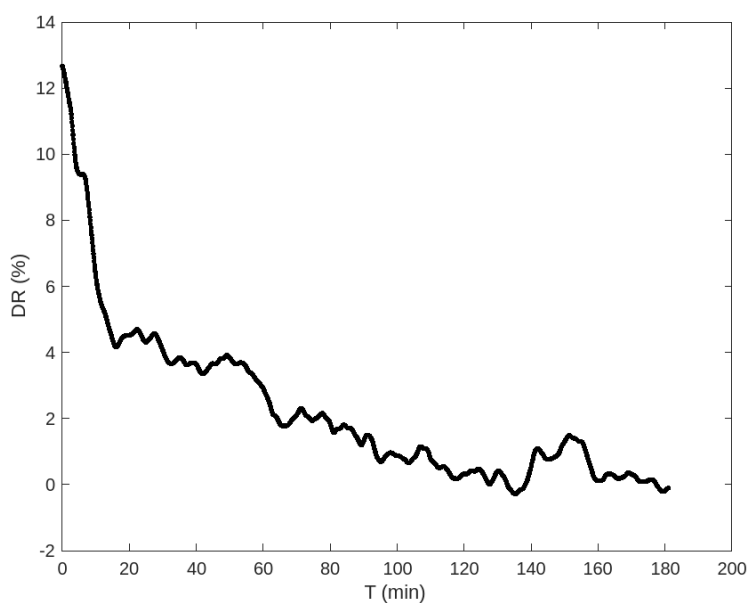


Figura 18: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 80 ppm de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C₁₂.

A seguir na Figura 19 vemos a redução de arrasto média para três experimentos em uma concentração de 60 *ppm*. Com essa concentração, pode-se observar uma redução de arrasto inicial de aproximadamente 14%. Neste caso a degradação total acontece após cerca de 150 minutos.

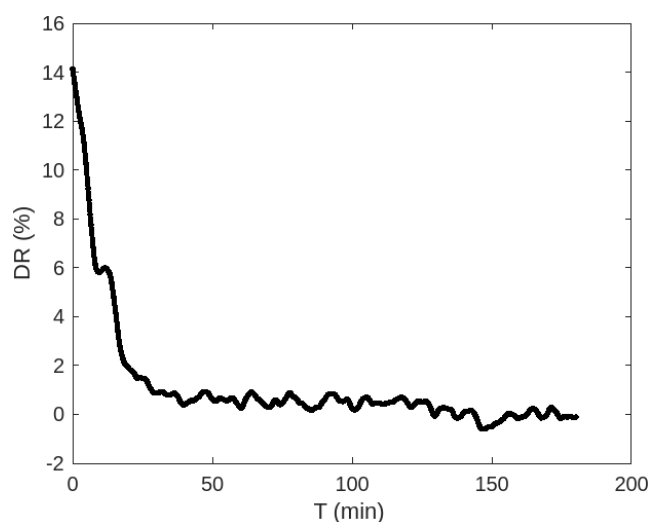


Figura 19: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 60 *ppm* de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C₁₂.

A seguir na Figura 20 vemos a redução de arrasto média para três experimentos em uma concentração de 40 *ppm*. Com essa concentração, pode-se observar uma redução de arrasto inicial de aproximadamente 9% com degradação completa em cerca de 150 minutos.

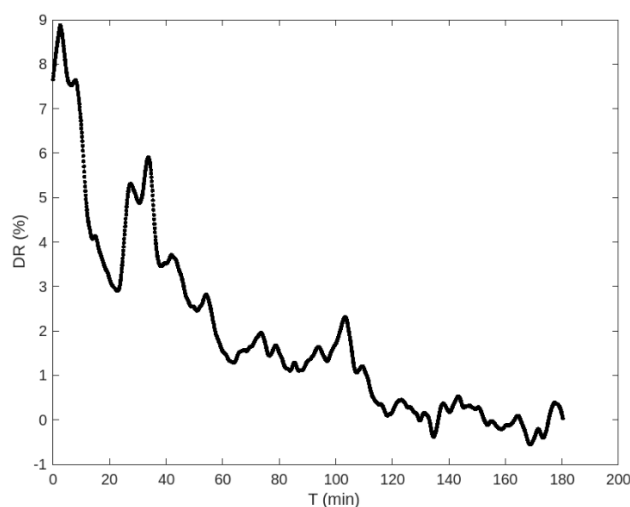


Figura 20: Resultados da variação temporal da redução de arrasto média para 40 *ppm* de concentração de polímero poli-isobuteno dissolvido em C₁₂.

Em seguida, o gráfico apresentado na Figura 21 mostra a redução de arrasto média exclusivamente devido às tensões cisalhantes na parede do tubo para polímero poli-isobuteno dissolvido em C_{12} nas concentrações de 100, 80, 60 e 40 ppm. Nota-se na figura que os tempos de degradação são aproximadamente os mesmos para todas as concentrações testadas e para o valor do número de Reynolds estudado.

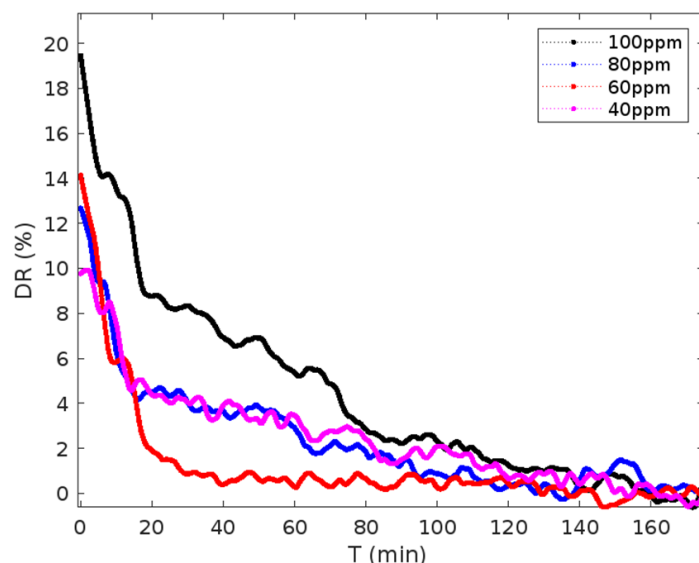


Figura 21: Variação da redução de arrasto ao longo do tempo para diferentes concentrações de poli-isobuteno.

Os resultados obtidos para o polímero poli-isobuteno dissolvido em C_{12} apontam para uma degradação significativa de seu desempenho como agente redutor de atrito para tempos relativamente curtos de cisalhamento. A título de exemplo, utilizando-se 100 ppm de polímero após cerca de 1 hora de escoamento a redução de atrito será de cerca de 5%. Admitindo-se, para fins de estimativa, uma velocidade média do escoamento de 2 m/s, isto significa que nova injeção de polímero deveria ser efetuada aproximadamente a cada 7 km para manter a redução de atrito mínima em patamar de 5%. Para linhas com dimensões reais de campo, estes volumes de injeção podem inviabilizar comercialmente o uso de polímeros redutores de atrito com desempenho semelhante ao poli-isobuteno testado.

É claro que esta observação preliminar deverá ser melhor avaliada em testes adicionais sob diferentes condições de operação.

5.

Conclusão

Este estudo avaliou a eficácia do polímero poli-isobuteno como agente redutor de atrito para escoamentos de produtos em dutos, com objetivo de redução da queda de pressão e aumento de vazão produzida em operações de produção de petróleo em instalações de campo. Os testes foram conduzidos em um dispositivo formado por um tubo em forma de círculo girando com velocidade angular constante. O torque imposto à roda girante foi utilizado para determinar o fator de atrito hidrodinâmico no tubo. Foram utilizadas soluções do polímero em C₁₂ nas concentrações de 100, 80, 60 e 40 ppm. Os testes foram conduzidos para uma velocidade angular de rotação fixa e igual 1,8 m/s, o que corresponde a um número de Reynolds de cerca de 26.630.

Os resultados para as maiores concentrações testadas apresentaram reduções de atrito de cerca de 20%, valores considerados significativos para aplicações industriais. No entanto, verificou-se degradação completa do efeito polímero em cerca de 150 minutos de operação. Para a menor concentração testada, a redução de atrito inicial foi de cerca de 8%, com tempo de degradação equivalente àquele observado para a maior concentração. De fato, o tempo de degradação do efeito do polímero mostrou-se praticamente insensível à concentração do polímero para a faixa de parâmetros investigada.

Os resultados reforçam a aplicabilidade do redutor de atrito na indústria, especialmente no setor de petróleo, onde a redução de atrito em dutos pode representar economias significativas de energia e custos operacionais. Contudo, o escopo deste trabalho foi limitado, uma vez que não contemplou todas as variáveis reais de operação. Foi calculada uma incerteza de 10% com 95% de confiabilidade, nos valores do coeficiente de atrito experimental, considerando as limitações dos instrumentos utilizados.

Este trabalho oferece uma base sólida para investigações futuras e destaca o potencial do redutor de atrito como uma possível solução para a otimização de sistemas de transporte de fluidos.

Para conclusões mais abrangentes e confiáveis, recomenda-se a realização de estudos adicionais para incorporar variáveis como número de Reynolds, temperatura e pressão, de forma a estudar com maior fidelidade as condições reais

de uso. Ensaios mais extensos também podem proporcionar uma análise mais detalhada da degradação do redutor ao longo do tempo, contribuindo para um entendimento mais completo de seu desempenho em cenários complexos.

6.

Referências

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.

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

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.

COSENZA, Ian de Souza. Estudo sobre a degradação de polímeros redutores de atrito em escoamentos turbulentos. 2019.

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.

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.

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.

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.

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.

FRUTEAU, A. et al. Application of Drag Reducer Agents on Multiphase Production Fluids. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. SPE, 2024. p. D031S040R004.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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

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.

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.

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.

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.

POPE, S. Turbulent Flows. *Measurement Science and Technology*, 12, 2020 - 2021, 2020

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.