

REDUÇÃO ATIVA DE ARRASTO POR SOLUÇÕES POLIMÉRICAS ALÉM DA ASSÍNTOTA DE VIRK NA GEOMETRIA TAYLOR COUETTE E OS EFEITOS DA INSTABILIDADE ELÁSTICA NA TURBULÊNCIA

Douglas Bruno Ferreira de Souza Mesquita, douglas.mesquita@iff.edu.br

Edson José Soares, edson.soares@ufes.br

Cleocir José Dalmaschio, cleocir.dalmaschio@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, ES, 29075-910, Brasil

Resumo. A redução de arrasto consiste na diminuição da resistência ao escoamento quando pequenas quantidades de certos aditivos são introduzidas no fluido. Este fenômeno foi identificado pela primeira vez na década de 1930 quando se observou a redução da queda de pressão em um escoamento turbulento de polpa de papel. Posteriormente, na década de 1970, o mesmo efeito foi observado ao inserir pequenas quantidades de polímeros no fluido. Já em 1975 foi proposto que a diminuição do atrito atingiria um limite universal, denominado Maximum Drag Reduction. Essa chamada Lei de Virk descreve uma fronteira assintótica de redução de arrasto, independentemente da natureza do aditivo. Pesquisas mais recentes sugerem próximo a concentração de sobreposição surge uma segunda barreira de redução de arrasto. O objetivo deste trabalho é investigar os limites da redução de arrasto em soluções poliméricas aquosas, verificar em quais condições a Lei de Virk é alcançada e identificar a segunda barreira em altas concentrações. Os experimentos são conduzidos em reômetros de alta precisão, que operam em baixos números de Reynolds, e em uma bancada experimental de maior escala, para verificar se o fenômeno da segunda fronteira também ocorre em condições de escoamento com números de Reynolds mais elevados nos tubos. Os testes já realizados nos reômetros indicam a ocorrência de uma segunda barreira de redução de arrasto, evidenciando que as soluções poliméricas podem ultrapassar o limite previsto pela assíntota de Virk sob determinadas condições.

Palavras-chave: Redução de Arrasto. Soluções Poliméricas. Turbulência. Atrito.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de fluidos é essencial em diversas áreas da engenharia, seja no fornecimento de água em centros urbanos ou no deslocamento de petróleo em oleodutos de grande extensão. A perda de carga associada ao atrito entre o fluido e as paredes da geometria do escoamento exige maior consumo de energia para o bombeamento e pode comprometer a capacidade operacional.

A eficiência no escoamento dos fluidos é uma das preocupações mais recorrentes da engenharia moderna, especialmente em sistemas industriais e de infraestrutura que operam em regime turbulento. Em oleodutos, redes de abastecimento de água, canais de refrigeração e processos industriais diversos, as perdas de energia causadas pelo atrito entre o fluido e as paredes do escoamento representam um obstáculo significativo para a redução de custos operacionais e para a sustentabilidade. Nesse contexto, a busca por soluções que minimizem tais perdas levou ao estudo de fenômenos capazes de alterar o comportamento da turbulência. Entre esses fenômenos, destaca-se a redução de arrasto, caracterizada pela diminuição significativa da resistência ao escoamento quando pequenas quantidades de certos aditivos são introduzidas no fluido.

O fenômeno da redução de arrasto foi identificado pela primeira vez quando Forrest e Grierson (1931) observaram a redução da queda de pressão em um escoamento turbulento de popa de papel.

Posteriormente na década de 1940, quando Toms (1948) identificou que pequenas quantidades de polímeros poderiam reduzir de forma significativa o atrito em escoamentos turbulentos, esse fenômeno, que ficou conhecido como redução de arrasto, tornou-se objeto de intenso estudo motivado tanto pelo interesse científico quanto pelas suas aplicações práticas.

Após quase um século desde que se observou a redução de arrasto pela primeira vez em 1931, hoje existem várias aplicações na indústria. Estes são alguns exemplos:

- Oleodutos e gasodutos;
- Sistemas de irrigação;
- Indústria naval;
- Circuitos de refrigeração;
- Sistemas de esgoto e escoamento urbano;
- Combate a incêndio;
- Biomedicina: circulação sanguínea.

Do ponto de vista tecnológico, a redução de arrasto é capaz de proporcionar economias expressivas em sistemas de transporte de petróleo, de água ou em processos de geração de energia. Estudos clássicos reportam, por exemplo, ganhos da ordem de 30% na vazão de oleodutos com a adição de polímeros (BURGUER; CHORN, 1980).

Posteriormente, Virk (1975) propôs que a diminuição do atrito atingiria um limite universal, denominado Maximum Drag Reduction (MDR). Essa chamada Lei de Virk descreve uma fronteira assintótica para a eficiência da redução de arrasto em soluções, independentemente da natureza do aditivo.

Portanto, os limites físicos do fenômeno da redução de arrasto impostos pela Lei de Virk ainda levantam questões não resolvidas, sobretudo para soluções de alto peso molecular e concentrações superiores à concentração de sobreposição (c^*).

Pesquisas mais recentes indicam que, em concentrações elevadas, acima da concentração de sobreposição (c^*), os polímeros podem gerar a presença de uma segunda barreira de redução de arrasto (WARHOLIC et al., 1999; LI et al., 2021). Resultados semelhantes foram observados por Barbosa et al. (2022), que reportaram DR acima da assíntota de Virk em soluções de diferentes polímeros, incluindo poliacrilamida (PAM), poliisobutileno (PIB) e goma diutana (DG), tanto abaixo quanto acima da concentração de sobreposição polimérica, evidenciando que a magnitude da redução de atrito pode ultrapassar os limites tradicionalmente aceitos, dependendo das propriedades do polímero e das condições de escoamento. A confirmação desse comportamento abriu um novo campo de investigação de redução de arrasto.

Outro ponto de destaque refere-se ao comportamento viscoelástico das soluções poliméricas. À medida que a massa molar e a concentração aumentam, os fluidos passam a exibir propriedades elásticas capazes de desencadear instabilidades mesmo em baixos números de Reynolds. Esse fenômeno, denominado instabilidade elástica, resulta do estiramento das cadeias poliméricas e do crescimento das tensões normais no escoamento (GROISMAN; STEINBERG, 2000). Observações experimentais sugerem que soluções de polímeros de maior massa molar apresentam transição para turbulência em taxas de cisalhamento mais baixas, reforçando a hipótese de que a elasticidade desempenha papel central nesse processo. Apesar dos avanços, a natureza exata dessas instabilidades e sua interação com a turbulência permanecem pouco compreendidas.

O polímero óxido de polietileno (PEO) é particularmente adequado a esses estudos devido à sua alta solubilidade em água, ampla disponibilidade em diferentes massas molares e comportamento reológico sensível à concentração. Além disso, o avanço na instrumentação como reômetros de alta precisão permitem investigar de forma detalhada os mecanismos de redução de arrasto, instabilidades elásticas e transição entre regimes de escoamento. O trabalho tem como principal objetivo investigar os limites da redução de arrasto em soluções poliméricas aquosas, com ênfase no óxido de polietileno (PEO). A pesquisa pretende verificar em quais condições experimentais a Lei de Virk é alcançada, analisar a possibilidade da existência de uma segunda barreira de redução de arrasto em concentrações acima da sobreposição (c^*), e compreender os efeitos das instabilidades elásticas no comportamento turbulento. Busca-se correlacionar massa molar, concentração e transição de regimes de escoamento, produzindo dados experimentais que contribuam para o avanço do conhecimento científico e para aplicações tecnológicas em transporte de fluidos.

2. METODOLOGIA

Os experimentos são conduzidos em dois equipamentos principais. Com a geometria Taylor–Couette, é utilizado um reômetro de alta precisão, e para os escoamentos em tubos utiliza-se uma bancada experimental de maior escala. O objetivo é investigar o comportamento da redução de arrasto em solução aquosa do polímero óxido de polietileno (PEO) para diferentes concentrações, massas molares e números de Reynolds.

Na geometria Taylor–Couette, os ensaios são realizados em um reômetro Haake Mars 60 da Thermo Scientific, equipado com geometria de cilindro concêntrico. Essa configuração permite operar em intervalos de taxa de deformação, que abrange regiões desde o regime laminar ao turbulento. A partir da medição do torque, é possível calcular a força de cisalhamento atuante no fluido, permitindo estimar o fator de atrito de Fanning, definido pela equação (1):

$$f_{Fanning} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho u^2} \quad (1)$$

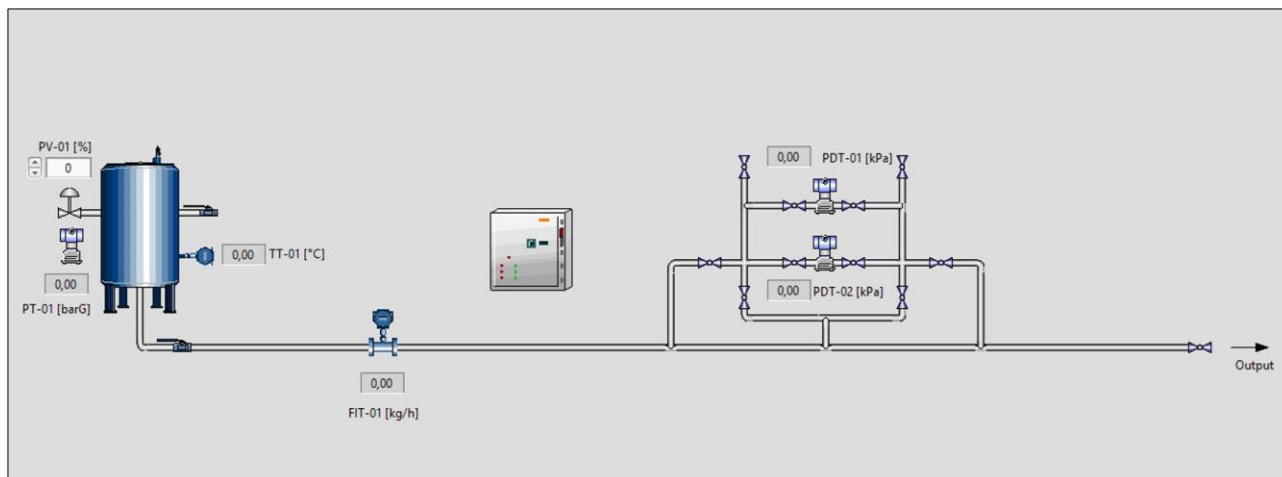
onde τ_w é a tensão de cisalhamento na parede, ρ é a densidade do fluido e u é a velocidade característica do escoamento na região de teste. O procedimento é realizado para soluções de PEO com massa molar 1×10^6 g/mol, 2×10^6 g/mol, 5×10^6 g/mol e 8×10^6 g/mol em concentrações variando entre 0,3 e 2500 ppm em números de Reynolds 5000, 10000, 15000 e 20000, de modo a explorar a interação polímero-turbulência.

Complementarmente, experimentos em regime turbulento são realizados em uma bancada experimental com tubos, projetada para operar em números de Reynolds mais altos visando investigar os fenômenos em escala mais próxima das condições aplicadas na indústria. Esse aparato é constituído por tanque de armazenamento, um sistema de ar comprimido, medidor de vazão e transdutores de pressão ao longo do tubo. A geometria do tubo e as medições de vazão e pressão permitem o cálculo do fator de atrito de Darcy através da equação (2):

$$f_{Darcy} = \frac{\Delta P \times D}{\frac{1}{2}\rho u^2 L} \quad (2)$$

em que ΔP é a queda de pressão ao longo da extensão L do tubo de diâmetro interno D . A Figura 1 apresenta o croqui da bancada experimental. Esse arranjo experimental possibilita a análise dos efeitos da degradação mecânica polimérica ao longo do tempo, bem como o impacto da concentração e do número de Reynolds sobre a redução de arrasto em regime turbulento totalmente desenvolvido.

Figura 1 – Aparato pneumático experimental de fluxo



Fonte: Produção do próprio autor.

Os experimentos realizados nos reômetros são conduzidos em temperatura controlada a 25 °C e com água deionizada como fluido base. Na bancada de maior escala os testes são realizados à temperatura ambiente e os polímeros são diluídos em água filtrada, já que são necessários volumes maiores de solução durante a operação. Os resultados obtidos nos dois equipamentos são complementares e permitem explorar os fenômenos de instabilidade elástica, transição para turbulência elástica e formação de barreiras de redução de arrasto em ampla faixa de número de Reynolds.

3. RESULTADOS

Os resultados experimentais obtidos permitem analisar o comportamento da redução de atrito em soluções aquosas de polímero na geometria Taylor–Couette.

A Figura 2 apresenta a evolução temporal de redução de arrasto (DR) para diferentes concentrações de Óxido de Polietileno (PEO) de massa molar 5 milhões g/mol diluído em água a Reynolds 15000. Observa-se que, para concentrações entre 0,3125 ppm e 10 ppm, o valor máximo de DR ocorre logo no início do experimento, seguido de um decaimento ao longo do tempo, indicando que nessas condições a contribuição polimérica é imediata, porém pouco sustentável sob cisalhamento contínuo. A partir de 50 ppm, o comportamento é diferente. O DR aumenta gradualmente até atingir um valor máximo apenas após um tempo característico de escoamento, indicando um transiente associado à orientação e estiramento das cadeias poliméricas no escoamento.

Nota-se ainda que, já na concentração de 2,5 ppm, o valor máximo de DR atinge a primeira barreira de redução de arrasto (MDR I), uma vez que as curvas correspondentes a 2,5 ppm, 5 ppm, 10 ppm, 50 ppm e 100 ppm apresentam valores máximos muito próximos. Entretanto, a 250 ppm, a curva ultrapassa a MDR I, confirmando a existência de um regime de redução de arrasto além do limite proposto por Virk. Para concentrações ainda maiores, como 1000 ppm e 2000 ppm, os valores de DR convergem para um novo patamar, caracterizando a segunda barreira de redução de arrasto (MDR II), em acordo com relatos recentes da literatura para soluções a cerca da concentração de sobreposição.

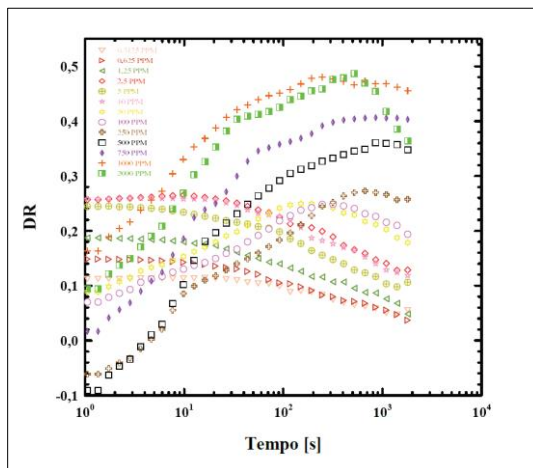
O mesmo procedimento experimental foi repetido para diferentes números de Reynolds, a saber, 5000, 10000, 15000 e 20000, utilizando a mesma solução de PEO de massa molar 5 milhões g/mol. Em todos os casos, o comportamento qualitativo da redução de arrasto foi semelhante ao observado para $Re=15000$, porém com variações nas concentrações e no tempo necessário para que o DR atingisse seu valor máximo.

Os resultados mostram que, embora o comportamento geral da redução de arrasto seja semelhante em todas as condições, as concentrações nas quais surgem a primeira barreira (MDR I) e a segunda barreira (MDR II) dependem do valor de Reynolds considerado. Em valores mais baixos de Reynolds, as barreiras MDR I e MDR II tendem a surgir em concentrações maiores, enquanto, para Reynolds elevados, as mesmas barreiras aparecem em concentrações menores.

A Figura 3 apresenta a relação entre o fator de atrito e o número de Reynolds para diferentes condições de escoamento. Observa-se que os dados experimentais para o fluido newtoniano seguem a tendência prevista para o regime laminar até aproximadamente $Re \approx 1000$, coincidindo com a solução teórica $f = 16/Re$. A partir desse ponto, ocorre a transição para a turbulência, e os valores experimentais passam a se situar acima da curva laminar, aproximando-se da curva clássica de Prandtl–Von Kármán para escoamento turbulento newtoniano.

Quando o polímero é adicionado à solução, nota-se uma redução progressiva do atrito conforme o número de Reynolds aumenta. Inicialmente, os valores de fator de atrito se aproximam da assíntota de Virk (MDR), indicando que a solução atinge a eficiência máxima de redução de arrasto prevista na literatura. Entretanto, para concentrações mais elevadas, os dados mostram um desvio sistemático abaixo da MDR, evidenciando a presença de uma segunda barreira de redução de arrasto. Essa região é representada na Figura 3 pelo conjunto de pontos que se localiza entre as curvas denominadas “MDR I” e “MDR II”, confirmando que, sob certas condições reológicas, a solução polimérica pode ultrapassar o limite imposto pela Lei de Virk.

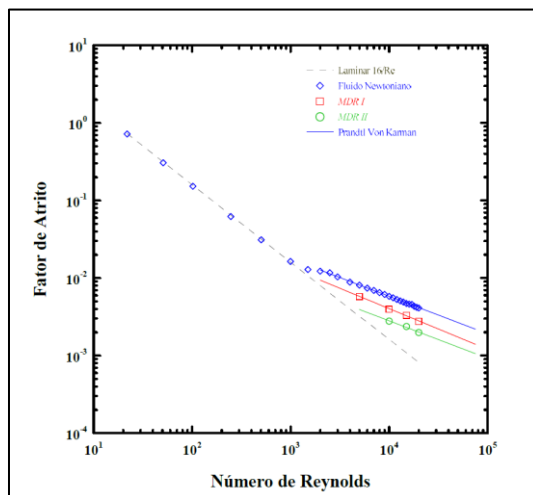
Figura 2 – DR em função do tempo para soluções aquosas de PEO em uma gama de concentrações no *Reynolds* 15.000



Fonte: Produção do próprio autor.

Em conjunto os resultados confirmam experimentalmente que a Lei de Virk pode ser atingida em condições de baixa concentração e alta taxa de cisalhamento, acima da concentração de sobreposição ocorre a formação de uma segunda barreira de redução de arrasto, superando o limite universal previsto por Virk e a evolução temporal da redução de arrasto evidencia que tanto o processo de estiramento molecular quanto a degradação mecânica das cadeias influenciam diretamente a eficiência do fenômeno ao longo do escoamento. Esses achados reforçam a relevância da interação entre turbulência e elasticidade em soluções poliméricas, especialmente para aplicações industriais em que o fluido permanece longos períodos sob cisalhamento elevado.

Figura 3 – Fator de atrito de Fanning em função do número de Reynolds



Fonte: Produção do próprio autor.

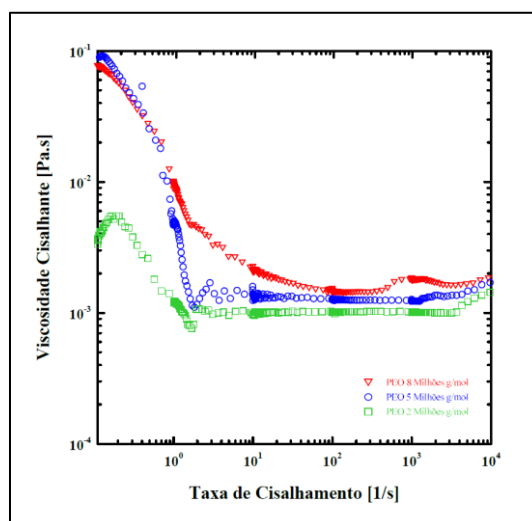
Além dos resultados de redução de arrasto, ensaios reológicos são conduzidos para medir a viscosidade das soluções de PEO utilizadas nos testes de DR. Os ensaios foram realizados no reômetro Haake Mars 60, em modo de varredura de taxa de cisalhamento, com o objetivo de obter as curvas de escoamento das soluções para diferentes massas molares e concentrações. Essas medições são fundamentais para estimar os parâmetros reológicos utilizados posteriormente nos cálculos do fator de atrito, como viscosidade efetiva e taxa de deformação característica.

As curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento obtidas nos testes revelam um comportamento típico de fluidos viscoelásticos. Inicialmente, observa-se uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento conhecido como afinamento por cisalhamento (shear thinning). Esse efeito é atribuído ao alinhamento progressivo das cadeias poliméricas na direção do escoamento, reduzindo a resistência interna ao movimento e levando à estabilização da viscosidade em um valor assintótico. Nesse ponto, o escoamento encontra-se em regime laminar permanente, e a viscosidade medida reflete a viscosidade real da solução para aquela taxa de cisalhamento, denominada viscosidade aparente em estado estacionário.

Entretanto, um comportamento distinto é observado na sequência. Após alcançar esse valor constante, a viscosidade volta a aumentar subitamente em determinadas faixas de taxa de cisalhamento. Esse aumento indica a transição do escoamento para o regime turbulento, em que a turbulência é interpretada pelo reômetro como um acréscimo na viscosidade do fluido. Em outras palavras, a viscosidade medida passa a incorporar não apenas a resistência viscosa intrínseca do fluido, mas também a chamada viscosidade turbulenta, que representa as tensões geradas pela flutuação caótica da velocidade no escoamento. Essa transição é de especial interesse para o presente estudo, pois evidencia o efeito das propriedades elásticas e reológicas do polímero sobre os mecanismos de transição de regime, sendo também indicativa de fenômenos ligados à instabilidade elástica, um dos pontos centrais desta pesquisa.

Os resultados das curvas de viscosidade revelam um comportamento inesperado quanto ao tempo de transição para o regime turbulento durante os ensaios. Como mostra a Figura 4, soluções preparadas com polímeros de maior massa molar, que naturalmente apresentam maior viscosidade, atingem o regime turbulento mais rapidamente do que soluções com polímeros de menor massa molar, quando submetidas às mesmas condições de cisalhamento no mesmo número de Reynolds. Essa tendência contraria a expectativa clássica de que fluidos mais viscosos apresentariam maior resistência ao escoamento turbulento devido à predominância das forças viscosas sobre as inerciais.

Figura 4 – Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para uma gama de massa molar de PEO



Fonte: Produção do próprio autor.

Tal observação sugere que, além dos efeitos puramente viscosos, outros mecanismos influenciam a estabilidade do escoamento das soluções poliméricas. Entre esses mecanismos destaca-se a instabilidade elástica, um fenômeno característico de fluidos viscoelásticos em que as tensões normais geradas pelo estiramento das cadeias poliméricas se tornam suficientes para desestabilizar o escoamento, mesmo em baixos números de Reynolds. Para polímeros de maior massa molar, a capacidade individual das cadeias de armazenar energia elástica ao serem submetidas ao cisalhamento é maior, favorecendo o surgimento de flutuações espaciais e temporais que levam à transição para regimes caóticos, comportamento conhecido como turbulência elástica (GROISMAN E STEINBERG, 2000).

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que as soluções poliméricas de óxido de polietileno (PEO) são capazes de promover redução significativa de arrasto em escoamentos turbulentos na geometria Taylor-Couette. Observa-se que, para concentrações baixas como 2,5 ppm, os valores de redução de arrasto já convergem para a assíntota de Virk (MDR I) para os casos com soluções de maior massa molar de PEO, enquanto que em concentrações superiores ou próximas da concentração de sobreposição molecular é possível identificar uma segunda barreira de redução de arrasto (MDR II), evidenciando que o limite estabelecido pela Lei de Virk pode ser superado sob condições específicas de massa molar, concentração e regime de escoamento.

Verificou-se ainda que o número de Reynolds exerce influência direta sobre a ocorrência das barreiras MDR I e MDR II, deslocando-as no eixo de concentrações.

Além disso, os ensaios reológicos evidenciam um comportamento inesperado durante a transição para o regime turbulento. Soluções com polímeros de maior massa molar, apesar de apresentarem maior viscosidade, transicionam mais rapidamente para regimes caóticos quando comparadas às de menor massa molar. Tal observação é associada ao surgimento de instabilidade elástica, fenômeno intrínseco a fluidos viscoelásticos em que as tensões normais acumuladas nas cadeias poliméricas desestabilizam o escoamento mesmo sob baixos números de Reynolds.

Esses achados avançam o entendimento do fenômeno e são fundamentais para a aplicação prática da redução de arrasto em sistemas de transporte de fluidos, especialmente em contextos onde o controle do cisalhamento, da degradação mecânica e da instabilidade elástica é determinante para a eficiência operacional.

Estão previstos novos ensaios experimentais em escoamento turbulento em tubos de maior escala, utilizando a bancada pneumática desenvolvida para operar em números de Reynolds superiores a 20.000. O objetivo é verificar se, sob condições reais de escoamento em tubos, é possível reproduzir o comportamento observado na geometria Taylor–Couette, especialmente no que se refere à formação da segunda barreira de redução de arrasto (MDR II). Esses testes permitirão avaliar a influência das condições hidrodinâmicas industriais, como maior extensão de cisalhamento, degradação mecânica prolongada e efeitos de contorno, sobre a capacidade das soluções poliméricas de ultrapassar o limite clássico de Virk em regime totalmente turbulento.

5. REFERÊNCIAS

- FORREST, F.; GRIERSON, G. A. Friction losses in cast iron pipe carrying. **Paper Trade Journal**, v. 92, p. 39-41, 1931.
- TOMS, B. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. **Proceedings of the International Congress of Rheology, Holland, North-Holland, Amsterdam**, Section II, pages 135–141, 1948.
- BURGER, E. D.; CHORN, L. G.; PERKINS, T. K. Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing Prudhoe Bay crude oil. **Journal of Rheology**, v. 24, n. 5, p. 603-626, 1980.
- VIRK, P. S. Drag reduction fundamentals. **AIChE Journal**, v. 21, n. 4, p. 625–656, 1975.
- 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, p. 461–472, 1999.
- BARBOSA, K. C. O.; CUSSUOL, J. D.; SOARES, E. J.; ANDRADE, R. M.; KHALIL, M. C. Polymer drag reduction below and above the overlap concentration. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v.310, n.104942, 2022
- LI, Y.; XU, C.; HUANG, S. Drag reduction of polymer solutions beyond the Virk asymptote. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 296, p. 104–130, 2021.
- GROISMAN, A.; STEINBERG, V. Elastic turbulence in a polymer solution flow. **Nature**, v. 405, p. 53–55, 2000.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Reologia Aplicada (LABREO/UFES) e ao Laboratório de Polímeros (LABPOL/UFES) pela infraestrutura disponibilizada para a realização dos experimentos. Agradecem também aos professores e a secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFES pelo suporte ao longo do desenvolvimento deste trabalho, bem como aos colegas de laboratório pelo auxílio nas etapas experimentais e pelas valiosas contribuições nas discussões técnicas. Os autores expressam sua gratidão a Deus e aos seus familiares pelo apoio incondicional e por compreenderem e suportarem a ausência durante o período de realização deste estudo. Por fim, agradecem ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.