

Influência polimérica na redução de arrasto em fluxos internos turbulentos em tubos de cloreto de polivinila (PVC)

Polymeric influence on drag reduction in turbulent internal flows in polyvinyl chloride (PVC) tubes

Luiz Paulo de Oliveira Queiroz^{1*}, Felipe Bento de Albuquerque¹, Jaqueline de Sousa Cardim², Juliana Stracieri², Gerson dos Santos Lisboa³

RESUMO

As perdas por atrito representam um importante do custo no caso de aviões e navios, assim como também nos submarinos e em dutos de transporte para longas distâncias. As crises políticas e financeiras em torno do mundo e o aumento do preço do barril de petróleo tem impulsionado o estudo da redução de arrasto (RA) em dutos. Este trabalho tem por objetivo estudar a influência polimérica na RA em fluxos internos turbulentos. Os polímeros selecionados para o estudo foram o polietilenoglicol 4000 (PEG 4000), o Polyox WSR N60K, Polyox WSR 301 e Polyox WSR 205. Os polímeros redutores de arrasto são investigados a partir da análise de fluxo turbulento, com variação do número de Reynolds (Re) e concentrações. As concentrações poliméricas trabalhadas foram: 5, 10, 30, 50 e 100 ppm. Os resultados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e quando significativos ao teste de Tukey (95% de significância). A obtenção da RA se deu mediante do diferencial de pressão medido entre dois pontos estabelecidos. O Polyox WSR N60K, o Polyox WSR 301 e o Polyox WSR 205 tiveram resultados satisfatórios, com destaque para o Polyox WSR 301 que apresentou 28,88% de RA na concentração de 100 ppm.

Palavras-chave: Polímeros; Escoamento turbulento interno; Bancada experimental; Redução de arrasto; Delineamento em blocos casualizados.

ABSTRACT

Frictional losses represent an important cost in the case of aircraft and ships, as well as in submarines and long-distance transport pipelines. Political and financial crises around the world and rising oil prices have driven the study of drag reduction (AR) in pipelines. This work aims to study the polymeric influence on AR in turbulent internal flows. The polymers selected for the study were polyethylene glycol 4000 (PEG 4000), Polyox WSR N60K, Polyox WSR 301 and Polyox WSR 205. Drag reducing polymers are investigated from turbulent flow analysis, with variation in Reynolds number (Re) and concentrations. The Polymer concentrations worked were: 5, 10, 30, 50 and 100 ppm. The results were submitted to variance analysis (ANOVA) and when significant to the Tukey test (95% significance). AR was obtained through the pressure differential measured between two established points. Polyox WSR N60K, Polyox WSR 301 and Polyox WSR 205 had satisfactory results, especially Polyox WSR 301, which presented 28.88% RA at the concentration of 100 ppm.

Keywords: Polymers; Internal turbulent flow; Experimental bench; Drag reduction; Randomized block design.

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, 59625-900, Brasil.

*E-mail: luiz.paulo@alunos.ufersa.edu.br

² Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, BA, 45662-900, Brasil.

³ Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 74690-900, Brasil.

INTRODUÇÃO

O fenômeno da RA foi primeiramente mencionado por Toms (1948) quando este apresentou que pequenas quantidades de polímeros de cadeias longas adicionadas ao escoamento poderiam reduzir a perda de carga. Este fenômeno ganhou notoriedade devido à sua importância no transporte de fluidos e economia de energia (LUO *et al.*, 2020; JEUNG; YONG, 2020)

A RA está presente nos escoamentos turbulentos e laminares, que são encontrados, frequentemente, em diversas aplicações de engenharia, como em compressores e bombas e ao redor de carros, aviões e navios. O atrito superficial, grande responsável pelas perdas energéticas, e consideravelmente maiores no tipo de escoamento turbulento do que em escoamentos laminares. Seu estudo é bastante desafiador, devido a sua natureza complexa (DAVIS; PARK, 2020).

Os estudos se concentram nos efeitos redutores de atrito dos surfactantes, fibras e polímeros para melhorar o desempenho da RA (ROSTI *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019).

Os polímeros apresentam excelente desempenho na RA, motivo este que seu potencial redutor é intensamente estudado em laboratórios para aplicações industriais (CHOUEIRI; LOPEZ; HOF, 2018).

O mecanismo de redução do arrasto para polímeros pode ser explicado pela “teoria da viscoelasticidade”. A energia armazenada nos vórtices de pequena escala na região de alta taxa de cisalhamento pode ser transferida e armazenada por cadeias poliméricas, então a energia pode ser liberada na forma de onda de tensão elástica quando as cadeias de poliméricas alcançam a região de baixa taxa de cisalhamento (ZHOU *et al.*, 2019). Assim, a energia cinética armazenada nos vórtices de pequena escala é transferida e armazenada nos vórtices de grande escala em vez de se converter em calor e dissipação. Este processo de transferência de energia reduz a dissipação da energia cinética turbulenta e economiza energia, o que é vantajoso para a RA (LIU *et al.*, 2021).

Em escoamentos de tubulares e canais abertos, a turbulência é muitas vezes responsável por mais de 90% das perdas por atrito. A utilização de polímeros como agentes redutores de arrasto tem se tornado um método muito eficiente e frequentemente utilizado para minimizar este arrasto de fricção. Estes polímeros, em geral, precisam possuir cadeia longa e peso molecular da ordem de 10⁶ Da (CHOUEIRI; LOPEZ; HOF, 2018).

O fenômeno da RA não é aleatório quanto à sua ocorrência e alcance. Existem dependências bem definidas quanto ao tipo de substância, concentração, peso molecular e as próprias condições do escoamento: 1) o fenômeno da RA, de forma geral, aumenta com o incremento da concentração polimérica, até atingir o valor da Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A.), valor a partir do qual maiores concentrações não produzem mais efeito redutor. 2) o fenômeno da RA varia com o diâmetro da tubulação. Maiores reduções de arrasto são conseguidas para tubulações de pequenos diâmetros. Em tubulações de diâmetros maiores, para se obter a mesma porcentagem de RA é necessária maior concentração polimérica (VIRK, 1971; WHITE; MUNGAL, 2008; XI; GRAHAM, 2012).

Este trabalho tem como objetivo identificar a influência polimérica na RA em escoamentos turbulentos em tubos de PVC. A influência da adição de polímeros é analisada a partir de uma bancada experimental construída no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) da UFRN. Os polímeros utilizados foram o polietilenoglicol 4000 (PEG 4000), Polyox WSR N60K, Polyox WSR 301 e Polyox WSR 205. Estes polímeros de diferentes pesos moleculares foram testados em diferentes concentrações e diferentes Re a uma temperatura constante de 25 °C. São realizadas análises da massa específica e viscosidade da água e das soluções poliméricas. Finalmente as soluções são testadas no sistema de bancada experimental e os resultados são obtidos. Além dos resultados obtidos experimentalmente, este trabalho contém tratamento estatístico dos dados por meio de um delineamento de blocos casualizados (DBC) com aplicação de análise de variância (ANOVA) e teste de Turkey (95% de confiança).

REFERENCIAL TEÓRICO

O fenômeno da redução do arrasto

As explicações referentes ao fenômeno da RA circulam em torno de duas ideias principais: a teoria viscosa, proposta independentemente por Lumley (1969) e Seyer e Metzner (1969), e a teoria elástica postulada por Tabor e de Gennes (1986). Detalhes adicionais sobre o mecanismo de RA também foram relatados por Dubief et al. (2004), Dimitropoulos et al. (2006), Thais, Gatski e Mompean (2013) e Pereira *et al.* (2017).

Os polímeros de alto peso molecular são aditivos particularmente eficientes na redução do arrasto mesmo em concentrações razoavelmente baixas. As propriedades mais importantes, que são comuns a esses aditivos poliméricos são: estrutura de cadeia muito longa com pouca ou nenhuma ramificação, alto peso molecular, flexibilidade e boa solubilidade (BESSA, 2008).

A RA foi elucidada ao se perceber uma queda no gradiente de pressão em uma tubulação, quando submetido à mesma vazão volumétrica na presença de aditivos. Um escoamento em uma tubulação interna envolve praticamente duas forças, são elas: forças normais e tangenciais. As forças normais estão ligadas a pressão, elas direcionam fluxo, em contrapartida as forças tangenciais retardam o fluxo, uma vez que elas dissipam a energia do escoamento na forma de calor devido à viscosidade do fluido, consumindo sua energia. Pode-se afirmar então, que os polímeros diminuem essas forças tangenciais facilitando o escoamento interno (LUMLEY ,1969; LIMA, 2018).

A formulação matemática da RA em termos de porcentagem, pode ser calculada mediante uma equação que envolva a queda de pressão no trecho considerado da solução polimérica e a queda de pressão em um trecho considerado do solvente, conforme apresentado na Eq. (1) (LUMLEY ,1969; BESSA, 2008).

$$RA(\%) = 1 - \frac{\Delta_{P_P}}{\Delta_{P_S}} \quad (1)$$

sendo Δ_{P_P} a queda de pressão no trecho considerado da solução polimérica e Δ_{P_S} a queda de pressão no trecho considerado do solvente.

Mohammadtabar, Sanders e Ghaemi (2020), estudaram a relação entre a RA e a viscoelasticidades de polímeros solúveis em água. Na ocasião foram investigados a poliácridamida (PAM), óxido de polietileno (PEO), goma xantana (XG) e a carboximetilcelulose (CMC). A PAM obteve uma RA inicial entre 50-58%, enquanto a RA do PEO foi de 44% e os polímeros rígidos (XG e CMC) forneceram uma RA mínima de 12%. Na oportunidade, também foi identificado que a RA e a degeneração mecânica foram ambas independentes da viscosidade de cisalhamento em taxas de cisalhamento baixas e altas.

Polímeros como agentes redutores de arrasto também são aplicados na área médica, em basicamente duas vertentes, *in vitro* e *in vivo*. Como exemplo, tem-se o estudo de Silva *et al.* (2020), que investiga o comportamento de três polímeros diferentes,

a poliacrilamida (PAM), o óxido de polietileno (PEO) e a goma xantana (XG) aplicado como agente redutor de arrasto em um plasma artificial.

Melhores resultados da RA também podem ser obtidos ao misturar um ou mais polímeros, principalmente quando essa união causa uma boa sinergia entre as moléculas poliméricas (EDOMWONYI-OTU; GIMBA; YUSUF, 2020).

Os polímeros redutores de arrasto também podem ser obtidos através da sintetização por polimerização em emulsão inversa, de forma a poder selecionar melhor seus componentes para trabalhar no ambiente almejado. Tan *et al.* (2020) desenvolveu três polímeros por meio desta metodologia para avaliar a RA em água doce e salgada. Foi observado na ocasião que em água doce o efeito da RA é reduzido à medida que o polímero redutor de arrasto ultrapassa o limite da concentração crítica, já na água salgada, o efeito da associação hidrofóbica favorece a RA.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais

Os polímeros utilizados neste trabalho foram:

- Polietileno glicol 4000;
- Polyox WSR 205;
- Polyox WSR N60K;
- Polyox WSR 301.

Os Polyox WSR N60K, Polyox WSR 301 e Polyox WSR 205 foram obtidos diretamente com a The Dow Chemical Company, já o PEG 4000 foi obtido através da distribuidora Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda.

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) da UFRN (5°50'34.7"S 35°11'48.2"W), assim como também a construção de toda a bancada experimental.

Os materiais necessários para construção da bancada experimental foram:

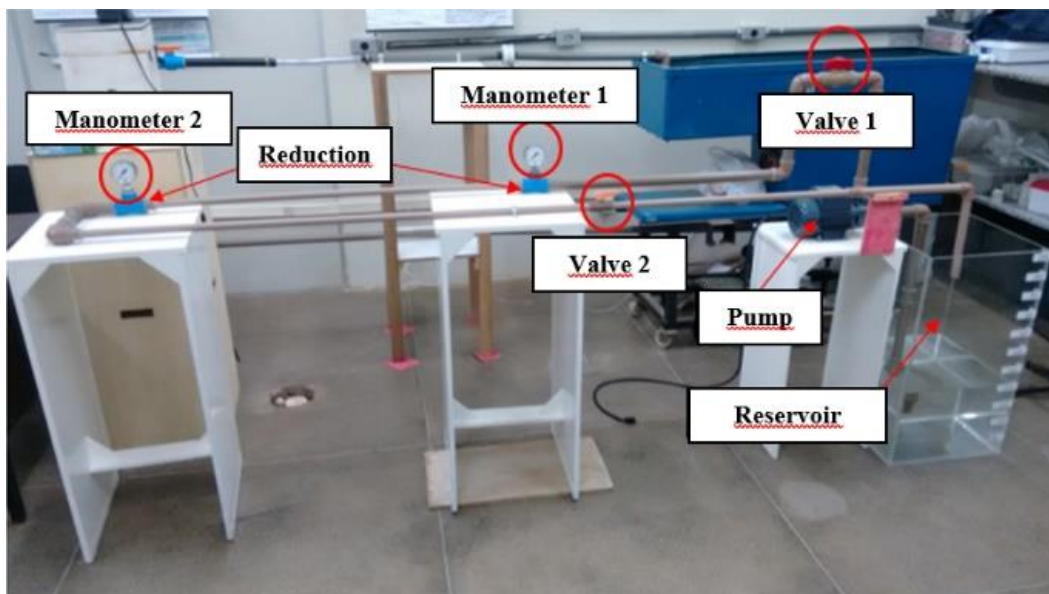
- 5 m de tubos PVC com diâmetro de 32 mm e rugosidade 0,0010 mm (Fabricante: KRONA);
- 1 m de tubo de PVC com diâmetro de 17 mm e rugosidade 0,0010 mm (Fabricante: KRONA);
- Três mesas de madeira, uma para suporte da bomba e as outras duas para suporte da tubulação;
- Duas válvulas de registro tipo esfera (Fabricante: KRONA);
- Um reservatório de acrílico com capacidade para 110 L;
- Uma válvula de pé com crivo para evitar a escorva excessiva da bomba (Fabricante: KRONA).

Os equipamentos que instrumentalizaram a bancada foram:

- Uma bomba periférica ($P_{\text{máx}}$: 0,5 hp; $Q_{\text{máx}}$: 32 L/min) (Fabricante: ORIENTE);
- Dois manômetros analógicos (FE: 8,5 psi) (Fabricante: SALVI).

A Figura 1 ilustra a bancada experimental construída com os materiais e equipamentos descritos nesta seção.

Figura 1 - Bancada Experimental.



Fonte: autoria própria.

Métodos

As concentrações trabalhadas foram 5, 10, 30, 50 e 100 ppm. Determina-se 40 L como o volume de trabalho do reservatório. Para 100 ppm em um volume de 40 litros, é adicionado 400 mg de polímero em um bécker de 4 litros com água e posteriormente agitada em um agitador magnético. Destaca-se a importância de adicionar o polímero de forma pulverizada, caso contrário, existe a possibilidade das partículas poliméricas se aglomerarem e dificultarem a diluição. O tempo de diluição está condicionado ao tipo de polímero e a quantidade de polímero diluído. De forma análoga, repete-se o procedimento para as demais concentrações e polímeros.

A obtenção da massa específica da solução procedeu-se por meio da medição da massa polimérica como soluto (5, 10, 30, 50 e 100 ppm), seguido de um preparo da solução e finalizado com a utilização do densímetro eletrônico (Modelo 4200M, Antoon Parr) para elucidação da massa específica). A viscosidade dinâmica foi obtida através de uma reômetro (Modelo R/S SST, Brookfield). A taxa de deformação das soluções poliméricas apresentou comportamento de fluido newtoniano, onde a viscosidade da solução é constante para diferentes taxas de deformação e não variam com o tempo. A temperatura de trabalho da água foi 25 °C.

Para que os resultados fossem melhor analisados, fez-se necessário variar o número de Reynolds e para isso o experimento foi realizado com a válvula registro tipo esfera em quatro posições, totalmente aberta, fechado 30°, fechado 50° e fechado 70°.

Como apresentado na Figura 1, os manômetros foram inseridos na bancada à um metro de distância um do outro, separados por um tubo de 17 mm de diâmetro. Essa redução de um metro através de um tubo de 17 mm foi necessária para evidenciar a queda de pressão entre os dois pontos e consecutivamente obter a RA.

A análise estatística aconteceu por meio de um delineamento em blocos casualizados (DBC) com aplicação de análise de variância (ANOVA), teste F para verificar a existência de diferença significativa entre as médias e o teste de Tukey a 95% de probabilidade para determinar quais médias diferem entre si. Para análise estatística da massa específica foram determinados 5 blocos e 4 tratamentos, sendo os blocos representados pelas concentrações poliméricas e os tratamentos pelos polímeros. Para a análise da RA foram delimitados 4 blocos e 3 tratamentos, sendo os blocos representados

pelas varrições da posição da válvula e os tratamentos sendo os tipos de polímeros que obtiveram redução de arrasto. O software estatístico de apoio foi o SISVAR (Versão 5.6).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da massa específica, ρ

As incertezas consideradas foram as metades da menor escala do número, sendo $\pm 0,5 \times 10^{-5}$ g/cm³ para densidade e $\pm 0,5 \times 10^{-4}$ g para massa.

A massa específica da água foi $\rho = 997,0 \frac{kg}{m^3}$. A massa específica dos polímeros é projetada na Tabela 1.

Tabela 1 - Massa específica ρ das soluções poliméricas (g/cm³).

ppm	PEG 4000	N60K	205	301
5	0,9958 ^{al}	0,9955 ^{al}	0,9958 ^{al}	0,9952 ^{al}
10	0,9948 ^{al}	0,9956 ^{al}	0,9958 ^{al}	0,9956 ^{al}
30	0,9957 ^{al}	0,9954 ^{al}	0,9960 ^{al}	0,9957 ^{al}
50	0,9958 ^{al}	0,9951 ^{al}	0,9962 ^{al}	0,9958 ^{al}
100	0,9956 ^{al}	0,9957 ^{al}	0,9958 ^{al}	0,9957 ^{al}

Obs.: Não existe diferença significativa ($p > 0,05$).

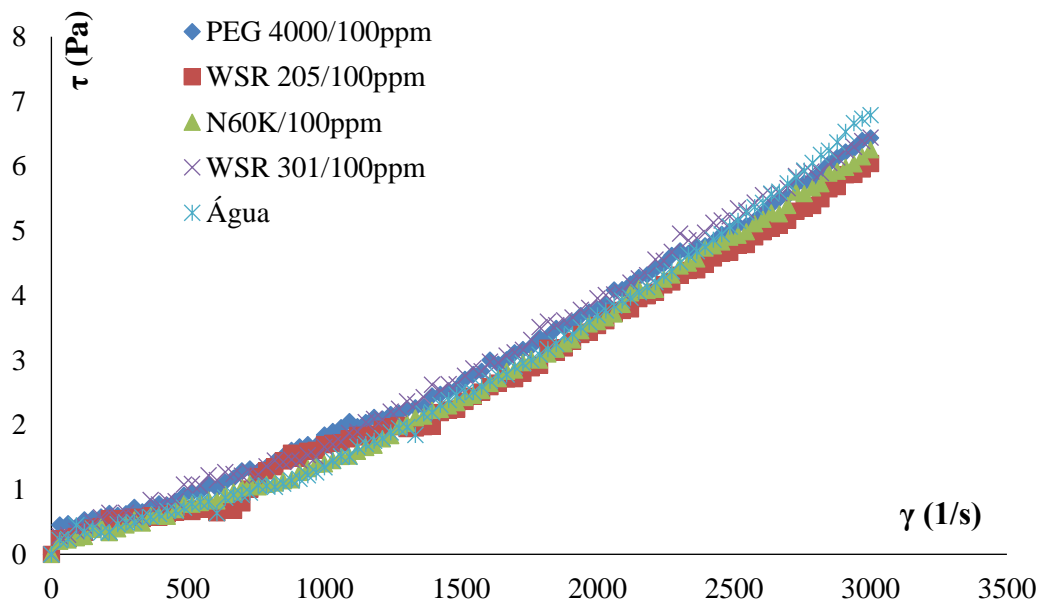
Fonte: autoria própria.

A variação da massa específica de acordo com a concentração é muito pequena, mesmo se considerarmos a menor concentração (5 ppm) com a maior concentração (100 ppm). É notável também que as massas específicas das soluções poliméricas para todas as concentrações são muito próximas, o destaque fica para o polyox WSR 205 que para as cinco concentrações se mostra com maior massa específica quando comparado com os demais polímeros estudados neste trabalho.

Análise da viscosidade dinâmica, μ

Com auxílio do reômetro, foi plotado a curva de tensão de cisalhamento (τ) versus taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) da água e soluções poliméricas. A viscosidade da água foi $\mu = 0,890 \times 10^{-3} Pa \cdot s$.

Figura 2 - Tensão de cisalhamento x taxa de deformação da água e soluções poliméricas.



Fonte: autoria própria.

Todas as análises foram feitas a 100 ppm, uma vez que não se fazia necessário realizar nas demais concentrações já que na maior concentração utilizada a solução polimérica já se comportava como fluido newtoniano. Percebe-se que em todas as curvas é visto certa linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, caracterizando assim como um fluido newtoniano.

Análise da água na bancada experimental

Com a justificativa de conhecer o comportamento da água no sistema e coletar alguns dados, a água livre de aditivo polimérico rodou no sistema experimental e obteve alguns resultados que são apresentados na Tabela 2. Cada linha da Tabela 2 representa uma posição específica da válvula, a primeira linha é na posição totalmente aberta, a

segunda com bloqueio de 30°, a terceira com bloqueio de 50° e a última com bloqueio de 70°.

Tabela 2 - Dados obtidos do fluxo somente com água.

Posições	P ₁ (kPa)	P ₂ (kPa)	Q (L/min)	V (m/s)	Re (10 ⁴)	f	h (mca)
Totalmente aberto	15,85	11,72	31,09	2,28	4,35	0,0218	0,34
Fechado 30°	15,49	11,57	30,55	2,24	4,27	0,0219	0,33
Fechado 50°	13,80	10,34	27,7	2,03	3,87	0,0223	0,28
Fechado 70°	6,67	4,90	20,42	1,5	2,86	0,0239	0,16

Fonte: autoria própria.

Observa-se que o Re diminui à medida que a vazão é reduzida por intermédio da alteração do ângulo de bloqueio da válvula, em contrapartida o fator de atrito tende a aumentar. Com o aumento do Re a perda de carga (h) no sistema também aumenta, devido a elevada turbulência no interior da tubulação. Pode-se verificar também que à medida que o diferencial de pressão (P₁ – P₂) é aumentado, o Re aumenta, isso porque ao fechar mais a válvula dificultando a passagem do fluido, a pressão vai diminuindo substancialmente e conseqüentemente vai diminuindo a vazão, ou seja, à medida que se reduz diminui o Re e junto com ele é reduzido o diferencial de pressão, uma vez que a turbulência está sendo reduzida.

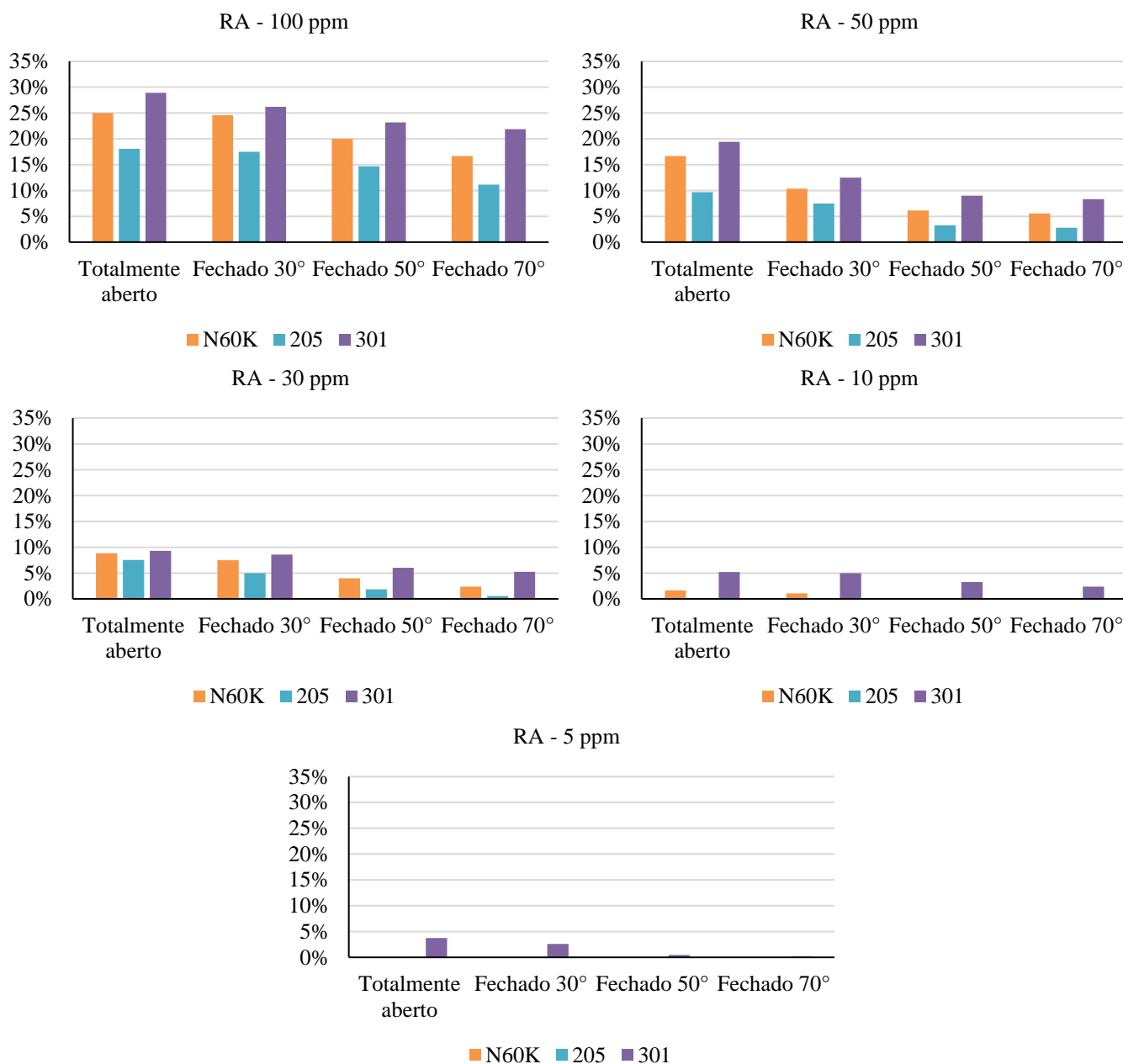
Influência polimérica na RA

O PEG 4000, notou-se diluição rápida, sendo que para cada 400 mg diluídas 4 litros o tempo foi de apenas 4 minutos. O PEG 4000 a 100 ppm não se mostrou um polímero eficiente na redução do arrasto, sendo assim não se fez necessário fazer novas medições para as demais concentrações, uma vez que a RA é mais eficiente em maiores concentrações. Este fator se deu por o PEG 4000 possuir o peso molecular muito abaixo quando comparado aos demais polímeros estudados, uma vez que a RA é um fenômeno que se apresenta com frequência para polímeros com alto peso molecular.

Na Figura 3, tem-se os resultados da RA para todas as concentrações poliméricas estudadas, é visível que a 100 ppm, o Polyox N60K, Polyox 205 e Polyox 301 são

polímeros redutores de arrasto. À medida que a passagem da válvula é reduzida, a RA diminui, é perceptível também que quanto maior a concentração polimérica, maior é a RA, isso no caso destes polímeros em estudo.

Figura 3 - RA x posições da válvula para as concentrações poliméricas.



Fonte: Autoria própria.

O Polyox 301 a 100 ppm na posição totalmente aberta da válvula, apresentou maior RA, seguido do Polyox N60K e o Polyox 205. O Polyox 301 obteve 28,88% de RA, o Polyox N60K chegou até 25,01% e o Polyox 205 chegou até 18,05%. O Polyox

301 confirma a hipótese da literatura, se destacando como um polímero eficiente na redução do arrasto, principalmente devido ao peso molecular ser da ordem de 106 Da. Em contrapartida, a degradação dos Polyox é mais rápida quando comparado com as poliacrilamidas (BESSA, 2008).

A 50 ppm os polímeros tiveram um percentual de RA menor. O Polyox 301 obteve uma RA de 19,42%, seguido do N60K com 16,72% e o Polyox 205 com 9,73%. Como a RA vai diminuindo, pode-se concluir que tanto a perda de carga como o fator de atrito vão aumentando à medida que a efetividade da RA diminui, da mesma forma que à medida que a RA aumenta a perda de carga e o fator de atrito diminui. Esta relação não está ligada a uma proporcionalidade infinita, sendo que a redução vai até um determinado limite de concentração, esse efeito pode ser explicado melhor em (VIRK, 1967).

O fato de o Polyox 301 reduzir mais do que os demais polímeros em estudo para a mesma concentração, está intrinsecamente ligado ao fato deste polímero possuir o peso molecular maior do que os demais polímeros estudados.

Em 30 ppm o Polyox 301 se mantém com o maior valor de RA, chegando até 9,32%, seguido novamente do N60K e do Polyox 205, com valores de redução de 8,86% e 7,55% respectivamente.

A 30 ppm a ideia que se tem é que a viscosidade das soluções poliméricas se aproxima cada vez mais da viscosidade da água, o que se justifica pelo pequeno percentual de redução obtido. A utilização de baixas concentrações para RA utilizando os polímeros estudados já não é uma ideia tão atrativa. Observa-se que o Polyox 205 a 30 ppm quase não tem RA no momento em que a válvula é bloqueada 70°, prevendo, portanto, que este polímero a 10 ppm provavelmente não terá mais efetividade na RA.

Em 10 ppm não se obtém RA com o Polyox 205 em nenhuma das posições, já com o N60K, ao fechar a válvula em 70° já não existe mais RA. Isso acontece porque a concentração polimérica está muito baixa e a viscosidade das soluções estão muito próximas da água, então quando eu reduzo a vazão eu altero o número de Reynolds, variável importantíssima na avaliação da RA.

Quando a válvula está totalmente aberta o Polyox 301 consegue obter o valor de aproximadamente 5,23% seguido do N60K com 1,72%. Por todo o procedimento experimental o Polyox 301 manteve-se à frente dos demais polímeros na RA.

Finalmente, em 5 ppm, somente o Polyox 301 apresentou resultados de RA, chegando a 3,81% com a válvula totalmente aberta. O Polyox 301 foi o único polímero

que obteve RA em todas as concentrações e em todas posições trabalhadas. Isto confirma a hipótese de que um dos fatores primordiais na redução do arrasto é o peso molecular do polímero, e o Polyox WSR 301 é o polímero de maior peso molecular entre os estudados, conseqüentemente obteve-se maior eficiência em todas as concentrações estudadas neste trabalho. Observe também que para o mesmo polímero (Polyox WSR 301), a RA vai diminuindo, isto por influência da redução da concentração e também do Re.

Análise estatística

A Tabela 3 apresenta os resultados da ANOVA e o teste de Tukey (95%) obtidos dos resultados experimentais.

Tabela 3 - Análise de Variância (ANOVA) e teste de Tukey (95%) dos dados de RA.

Polímeros	5 ppm		10 ppm		30 ppm		50 ppm		100 ppm	
	\bar{X}	Teste	\bar{X}	Teste	\bar{X}	Teste	\bar{X}	Teste	\bar{X}	Teste
205	0	a ¹	0	a ¹	3,75	a ¹	5,85	a ¹	15,33	a ¹
N60K	0	a ¹	0,69	a ¹ , a ²	5,67	a ²	9,72	a ²	21,58	a ²
301	1,74	a ¹	3,4	a ¹	7,30	a ³	12,32	a ²	25,03	a ³
	$p > 0,05$		$p < 0,05$		$p < 0,05$		$p < 0,05$		$p < 0,05$	

Fonte: autoria própria.

A análise confirmou o que se apresentou graficamente na Figura 3. À 5 ppm não existe diferença significativa entre os polímeros na RA. De 10 ppm à 100 ppm análise mostra que existe diferença significativa entre os polímeros na RA à medida que a concentração polimérica é aumentada. Nesse caso, é permitido afirmar que os resultados obtidos entre 10 e 100 ppm possuem relevância estatística e fortalecem os resultados experimentais.

CONCLUSÕES

O Polyox 301 se mostrou como o polímero mais eficiente na RA, dentre dos polímeros trabalhados. À medida que a concentração polimérica vai diminuindo, a eficiência na RA também diminui. A RA é mais eficiente para polímeros de alto peso molecular da ordem de 106 Da. Todas soluções poliméricas se confirmaram como fluido Newtoniano. A RA se mostrou dependente do tipo de polímero, da sua concentração, do peso molecular do polímero e do número de Reynolds. Polímeros com peso molecular da ordem de 1000 Da não apresentam RA em tubos rígidos de PVC conforme visto nos resultados do PEG 4000. Finalizando, essa pesquisa mostrou a influência polimérica como agentes redutores de arrasto.

REFERÊNCIAS

BESSA, Kleiber Lima. **Redução de arrasto por adição de polímeros em escoamento pulsátil laminar e turbulento em leitos arteriais caudais de ratos normotensos e hipertensos e tubos rígidos**. 2008. 158 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2008.

CHOUERI, George H.; LOPEZ, Jose M.; HOF, Björn. Exceeding the Asymptotic Limit of Polymer Drag Reduction. **Physical Review Letters**, [S.L.], v. 120, n. 12. 19 mar. 2018. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.120.124501>.

DAVIS, Ethan A.; PARK, Jae Sung. Dynamics of laminar and transitional flows over slip surfaces: effects on the laminar-turbulent separatrix. **Journal Of Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 894, A16, 4 maio 2020. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2020.282>.

DIMITROPOULOS, Costas D. *et al.* Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow of inhomogeneous polymer solutions. **Journal Of Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 566, p. 153, 5 out. 2006. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112006002321>.

DUBIEF, Yves *et al.* On the coherent drag-reducing and turbulence-enhancing behaviour of polymers in wall flows. **Journal Of Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 514, p. 271-280, 10 set. 2004. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112004000291>.

EDOMWONYI-OTU, Lawrence Chukwuka; GIMBA, Muhammed Muhammed; YUSUF, Nurudeen. Drag Reduction with Biopolymer-Synthetic Polymer Mixtures in Oil-Water Flows: effect of synergy. **Engineering Journal**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 1-10, 30 nov. 2020. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University. <http://dx.doi.org/10.4186/ej.2020.24.6.1>.

GENNES, P.G. de. Towards a scaling theory of drag reduction. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [S.L.], v. 140, n. 1-2, p. 9-25, dez. 1986. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-4371\(86\)90200-1](http://dx.doi.org/10.1016/0378-4371(86)90200-1).

JEUNG, Yongjae; YONG, Kijung. Underwater superoleophobicity of a superhydrophilic surface with unexpected drag reduction driven by electrochemical water splitting. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 381, p. 122734, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.122734>.

LIMA, Diogo de Azevedo. **Redução de arrasto induzida por polímeros em escoamento turbulento de águas de mananciais**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2018.

LIU, Dongjie *et al.* Enhanced drag reduction performance by interactions of surfactants and polymers. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 232, p. 116336, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2020.116336>.

LIU, Yibin *et al.* Design and preparation of biomimetic polydimethylsiloxane (PDMS) films with superhydrophobic, self-healing and drag reduction properties via replication of shark skin and SI-ATRP. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 356, p. 318-328, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.022>.

LUMLEY, J L. Drag Reduction by Additives. **Annual Review Of Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 367-384, jan. 1969. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fl.01.010169.002055>.

LUO, Guanzhou *et al.* Robust and durable fluorinated 8-MAPOSS-based superamphiphobic fabrics with buoyancy boost and drag reduction. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 383, p. 123125, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.123125>.

MOHAMMADTABAR, M.; SANDERS, R.s.; GHAEMI, S. Viscoelastic properties of flexible and rigid polymers for turbulent drag reduction. **Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 283, p. 104347, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2020.104347>.

PEREIRA, Anselmo S. *et al.* Transient aspects of drag reducing plane Couette flows. **Journal Of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 241, p. 60-69, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.01.008>.

ROSTI, Marco Edoardo *et al.* Flexible Fiber Reveals the Two-Point Statistical Properties of Turbulence. **Physical Review Letters**, [S.L.], v. 121, n. 4, 24 jul. 2018. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.121.044501>.

SEYER, F. A.; METZNER, A. B. Turbulence phenomena in drag reducing systems. **Aiche Journal**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 426-434, maio 1969. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690150324>.

SILVA, Renata T. *et al.* Drag Reduction by Polymers in Saline Nutrient Solutions. **Journal Of Fluids Engineering**, [S.L.], v. 142, n. 8, 1 abr. 2020. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4046691>.

THAIS, L.; GATSKI, T.B.; MOMPEAN, G. Analysis of polymer drag reduction mechanisms from energy budgets. **International Journal Of Heat And Fluid Flow**, [S.L.], v. 43, p. 52-61, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.05.016>.

TOMS, B. A. **In: first int. Rheological congress**, Proc. Part.2, p.135-142, 1948.

VIRK, P. S. An elastic sub layer model for drag reduction by dilute solutions of linear macromolecules. **J. Fluid Mech.** 45, 417-440. 1971.

VIRK, P.S.; MERRILL, E.W.; MICKLEY, H.S. and SMITH.K.A. The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. **Journal of Fluid Mechanics**, 30(2): 305-328, 1967.

WHITE, Christopher M.; MUNGAL, M Godfrey. Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives. **Annual Review Of Fluid Mechanics**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 235-256, 1 jan. 2008. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102156>.

XI, Li; GRAHAM, Michael D. Dynamics on the Laminar-Turbulent Boundary and the Origin of the Maximum Drag Reduction Asymptote. **Physical Review Letters**, [S.L.], v. 108, n. 2, 11 jan. 2012. American Physical Society (APS). <http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.108.028301>.

ZHOU, Wenjing *et al.* Energy analysis of a surfactant micelle's deformation by coarse-grained molecular dynamics simulations. **Chemical Engineering Science**, [S.L.], v. 202, p. 138-145, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2019.03>

Recebido em: 15/11/2021

Aprovado em: 10/12/2021

Publicado em: 15/12/2021