



IBP1218_06 REDUÇÃO ATIVA DE ATRITO HIDRODINÂMICO EM SISTEMAS AQUOSOS E ORGÂNICOS

Edvaldo Sabadini¹, Vanessa C. Bizotto², Kelly R. Francisco³

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Quando pequenas quantidades (da ordem de ppm) de polímeros de elevada massa molecular são dissolvidos num fluido, elevados níveis de redução de atrito hidrodinâmico (RA) podem ser obtidos em fluxo turbulento. Tal fenômeno depende significativamente da massa molecular e flexibilidade da cadeia macromolecular, e do nível de turbulência. Um fluido contendo um agente redutor de atrito, sob fluxo turbulento, requer menor pressão para manter a mesma vazão do fluido puro. As teorias que tratam do fenômeno de RA são necessariamente complexas. Uma delas assume que as cadeias da macromolécula, sob elevado cisalhamento, sofrem alongação dinâmica, absorvendo a energia dos vórtices. A energia armazenada é então restituída como ondas elásticas, resultando na redução de atrito. Em certas condições experimentais, o atrito hidrodinâmico pode ser reduzido em até 70%. Por este motivo, o fenômeno é de grande interesse para aplicações tecnológicas relacionadas com o transporte de líquidos, como é o caso na produção e transporte de petróleo. Neste trabalho serão apresentados os resultados de RA em meios aquosos e orgânicos, obtidos em um reômetro rotacional, no qual o tipo de agente redutor de atrito, sua massa molecular, concentração e temperatura foram investigados.

Abstract

The presence of very small amounts (in the range of ppm) of high-MW polymers dissolved in a fluid produces high levels of drag reduction (DR) in a turbulent flow. This phenomenon is highly dependent not only on polymer-MW, but also on the flexibility of the macromolecular chain, and the level of turbulence. A fluid containing a DR agent in a turbulent flow requires a lower pipe flow pressure gradient than the pure fluid to produce the same flow rate. The theories for DR are necessarily complex. One theory assumes that the added macromolecules, under high shear, undergo a dynamic chain elongation, absorbing the energy of the eddies in the flow. This energy is then dissipated as elastic shear waves, producing such phenomenon. DR levels may reach 70% under laboratory. Consequently, the phenomenon has become of considerable engineering interest, mainly in pumping processes, as such those involved in oil production and transportation. This work presents the DR results in water and oil phases, obtained in a rotational rheometer, in which the nature, the molecular weight, concentration of drag reducing agents, temperature and levels of turbulence were investigated.

1. Introdução

1.1. Redução de Atrito Hidrodinâmico

Em vários processos que envolvem o bombeamento de fluidos é interessante estudar o fenômeno de redução de atrito hidrodinâmico, pois, a adição de agentes redutores de atrito hidrodinâmico pode reduzir grandemente perdas de energia. Como exemplos de processos que utilizam técnicas de redução de atrito temos: sistemas de aquecimento e resfriamento de circuitos (Choi et al., 2000); extinção de incêndios (Figueredo e Sabadini, 2003); sistemas de irrigação, etc. A aplicação da redução de atrito em sistemas de bombeamento de petróleo é um dos exemplo mais significativos,

¹ PhD, Químico – Instituto de Química - UNICAMP

² Doutoranda, Química – Instituto de Química - UNICAMP

³ Doutoranda, Química – Instituto de Química - UNICAMP

como é o caso do transporte de óleo bruto no oleoduto do Alasca, por cerca de 1300 km. A adição de redutores de atrito permite uma economia de energia em torno de 20% (Andreis et al., 1989).

São conhecidas várias classes de substâncias que atuam como redutoras de atrito, tais como polímeros sintéticos, biopolímeros, suspensão de fibras, partículas sólidas e sistemas micelares capazes de produzirem macroestruturas (“worm-like”). Os polímeros sintéticos e biopolímeros são os mais estudados por serem mais eficazes na redução de atrito hidrodinâmico, sendo que estes devem ter estrutura linear, serem flexíveis e de elevada massa molar (da ordem de 10^6 g mol⁻¹). Entretanto, os polímeros têm a desvantagem de serem propensos a degradações mecânicas e térmicas (Morgan e McCormick, 1990).

Os sistemas aquosos são os mais estudados. Entretanto, existe um grande interesse na redução hidrodinâmica de atrito em meios orgânicos, pois do ponto de vista fundamental, as interações polímero-solvente são significativamente diferentes do que nos sistemas aquosos. Do ponto de vista aplicado, existe grande interesse em reduzir a energia na produção e bombeamento de combustíveis, em especial os hidrocarbonetos e etanol. Para hidrocarbonetos, os seguintes agentes são utilizados: poliisobutileno, PIB, que é bastante solúvel em óleo cru (Choi et al., 1996), poliestireno (PS) (Nakken et al., 2004) e poliolefinas (Nakken et al., 2001). Para os sistemas aquosos, os polímeros mais estudados são poli(acrilamida) (PAM) e poli(óxido de etileno) (PEO) (Andreis et al., 1989).

Diversas teorias foram propostas para explicar o fenômeno de redução de atrito hidrodinâmico, mas nenhum modelo é aceito totalmente. Isto se deve em parte a dificuldade em descrever a natureza detalhada da turbulência e da diluição extrema das soluções poliméricas (Hershey e Zakin, 1967). De forma consensual, tais teorias indicam que as moléculas poliméricas interferem com a produção, desenvolvimento ou o transporte de turbulência. Algumas consideram o comprimento da cadeia polimérica ou o raio de giração (modelos de escala de comprimento) (Virk, 1975), outras estimam o tempo de relaxação da macromolécula (escala temporal) (Lumley, 1969). Outras teorias correlacionam a habilidade das macromoléculas alterarem o balanço de energia do fluxo turbulento (teorias de energia) (Morgan e McCormick, 1990).

De Gennes e Tabor (1990) propuseram uma abordagem interessante da redução de atrito, conhecida como Teoria Elástica da redução de atrito, que se baseia na interferência causada pelo polímero nas flutuações tridimensionais de velocidade que ocorrem quando a solução polimérica escoar. Estas flutuações estão relacionadas com a turbulência que ocorre no fluido, levando a produção de vórtices que crescem na forma de uma “cascata”, e conseqüentemente à perda de energia. Esta hierarquia de vórtices está descrita na teoria da cascata de Kolmogorov.

Esse modelo assume que para cada escala espacial r de um dado fluido sob fluxo, há um espectro de flutuações de velocidade $U(r)$, associado com uma dada frequência $(U(r)/r)$. O termo $(U^3(r)/r)$ é igual a uma constante ϵ , que representa a dissipação de energia no fluido por unidade de massa de fluido.

A frequência $(U(r)/r)$ pode ser comparada ao inverso do tempo de relaxação do polímero, $(1/\tau)$, que é estimado pelo modelo de Rouse-Zimm (Rouse, 1953; Zimm, 1956). Este modelo considera que os movimentos dos segmentos poliméricos (representados por esferas rígidas ligadas por molas) são regidos pelas interações hidrodinâmicas, sendo que através destes movimentos, a macromolécula armazena energia elástica e posteriormente a dissipa como energia viscosa. Este modelo produz um espectro contínuo de tempos de relaxação, correspondente aos modos coordenados das vibrações moleculares. O tempo de relaxação (τ_i) para um determinado modo cooperativo da cadeia é dado por:

$$\tau_i = \frac{(M\eta_s[\eta])}{0,586RT\lambda_i} \quad (1)$$

onde M é a massa molar viscosimétrica média, η_s é a viscosidade do solvente, $[\eta]$ viscosidade intrínseca da solução polimérica, R é a constante dos gases, T é a temperatura da solução e λ_i são os autovalores que estão associados aos modos de vibração coordenados da cadeia polimérica. O tempo de relaxação para $\lambda_i = 1$ (Equação 1), representa o tempo que a macromolécula leva para ir do estado totalmente esticado ao seu estado de equilíbrio (enovelado).

Dentro do conceito de deformação passiva, De Gennes considerou duas situações de deformação do novelo polimérico sob escoamento: uma, onde as cadeias se encontram semi-estendidas e a outra, onde as cadeias estão totalmente esticadas. Assim, as cadeias poliméricas se comportam como molas anarmônicas, que ao serem esticadas armazenam energia elástica. Nesta dinâmica de estiramento e contração, a inércia do fluido escoando não é capaz de gerar vórtices com determinada dimensão crítica. Dessa forma, pela ação das cadeias polimérica, a formação de novos micro-vórtices é fortemente restrita, levando a um truncamento da cascata de vórtices que se desenvolveria, caso o polímero não estivesse presente, resultando em larga redução do atrito hidrodinâmico.

Em geral, as medidas de redução de atrito são feitas em função do torque medido em reômetros rotacionais (Choi et al., 2000; Cowan et al., 2001) ou em tubos capilares que possuem transdutores de pressão que permitem medir diferenças de pressão (Hoyt, 1966; Bailey e Kolesve, 1976). Recentemente, demonstramos que a visualização da dinâmica de deformação do fluido a partir do impacto de uma gota contra uma superfície líquida rasa, também pode ser

utilizada para estudar o fenômeno (Sabadini e Alkschbirs, 2001; Sabadini e Alkschbirs, 2002; Sabadini e Alkschbirs, 2004; Alkschbirs et al., 2004).

1.2. Fluxo entre Superfícies de Cilindros Concêntricos Rotacionais (*Double Gap*)

Recentemente (Nakken et al., 2001), apresentaram uma nova técnica para estudar a redução de atrito hidrodinâmico usando um reômetro contendo sensores cilíndricos concêntricos de parede dupla. Neste tipo de experimento, o torque necessário para deformar o fluido contendo o agente redutor de atrito, em condições turbulentas, é menor que o correspondente torque aplicado ao solvente puro. O ponto mais atraente desta técnica é a grande precisão ($\pm 2,5\%$) que pode ser obtida em termos de torque e taxa de deformação, além da pequena quantidade de amostra e tempo de análise.

Neste sistema, as amostras são localizadas entre duas superfícies interconectadas e coaxiais com simetria cilíndrica, tipo “double gap” (representado esquematicamente na Figura 1). Um tubo coaxial (rotor) está localizado entre estas duas superfícies cilíndricas. O rotor pode rodar sobre o eixo do recipiente da amostra com uma velocidade angular selecionada ou sofrer pequenos deslocamentos angulares harmônicos. A grande superfície de contato permite obter baixas medidas de tensão (Nakken et al., 2001).

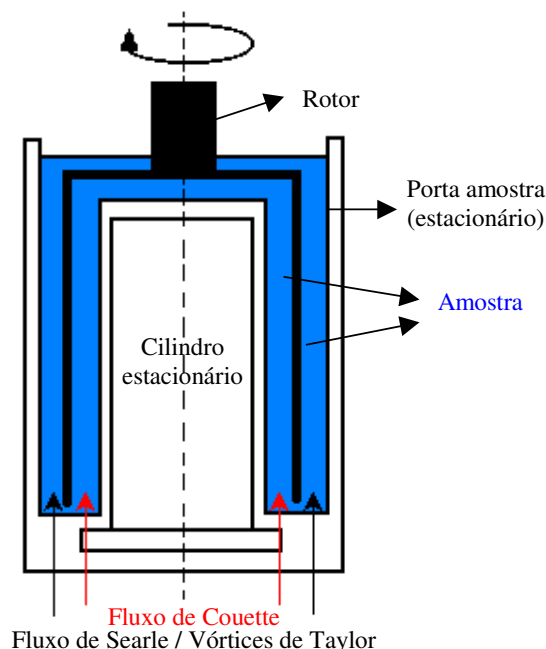


Figura 1. Ilustração esquemática do sistema *double gap* com simetria axial. O recipiente contendo a amostra é estacionário, enquanto o fino tubo cilíndrico colocado no líquido pode rodar sobre o eixo de simetria cilíndrica.

A transição do regime de escoamento de laminar para turbulento ocorre através de diversos estágios quando a velocidade angular do rotor é aumentada. Devido à força centrífuga, há diferenças entre os campos de fluxo do fluido das partes da amostra localizadas no lado interno e externo do rotor (Figura 1).

Na parte da amostra localizada no lado interno do rotor, o campo de fluxo em baixas velocidades angulares é laminar e é denominado como fluxo Couette.. A força centrífuga associada com a rotação do fluido contribui para a estabilização do campo de fluxo, mas este se torna instável quando o número de Reynolds (Re) excede 50000.

Na parte da amostra localizada no lado externo do rotor, o campo de fluxo do fluido em baixa velocidade angular é denominada de fluxo Searle. Nesta parte da amostra, a força centrífuga associada com a rotação do fluido contribui para a desestabilização do campo de fluxo. Desta forma, a transição do regime laminar ao turbulento ocorre através de fases distintas quando a velocidade angular do rotor é aumentada. O início da instabilidade dinâmica do fluido é denominada por instabilidade de Taylor. Esta instabilidade muda o campo de fluxo de laminar para um campo complexo, consistindo de pares de vórtices que se opõem ao fluxo (vórtices de Taylor). Para grandes velocidades angulares do rotor, é formado um fluxo totalmente caótico (turbulento) em ambas as partes da amostra, localizadas do lado interno e externo do rotor (Groisman e Steinberg, 1996; Nakken et al., 2001).

A curva de fluxo (tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento) pode ser bastante alterada, em relação a um fluido puro, se o agente redutor de atrito está presente. O torque aplicado pelo reômetro para se obter certa taxa de deformação é menor, quando certo nível de turbulência é atingido. As cadeias poliméricas são capazes de

interagir com os micro-vórtices, produzidos na amostra de fluido, presentes em ambas as câmaras do acessório de cilindros concêntricos. Assim, outra vantagem da técnica proposta por Nakken, está relacionada com a medida da redução de atrito hidrodinâmico em ampla faixa de deformação. A elevada sensibilidade da técnica permite detectar efeitos bastante sutis, como por exemplo, aqueles relacionados com a flexibilidade das cadeias poliméricas e a interação polímero-solvente.

A magnitude da redução de atrito hidrodinâmico (RA), pode ser determinada em qualquer nível de turbulência, dentro da faixa operacional do reômetro. A viscosidade aparente, obtida pela derivada da curva de fluxo, permite determinar a porcentagem de redução de atrito hidrodinâmico, conforme Equação 2.

$$\%RA = \frac{\eta_s - \eta_p}{\eta_s} \times 100 \quad (2)$$

onde η_s e η_p são as viscosidades aparentes do solvente puro e da solução polimérica, respectivamente. Pela Equação 2, notas-se que a porcentagem de redução de atrito será tanto menor quanto menor for a viscosidade aparente da solução polimérica.

2. Materiais e Métodos

2.1. Soluções Poliméricas

Os polímeros utilizados nos experimentos foram: PEO (Aldrich) de massas molares 9×10^5 , 2×10^6 , 4×10^6 , 5×10^6 e 8×10^6 g mol⁻¹, PAM (BDH) 5×10^6 g mol⁻¹ e PIB (Aldrich) $1,2 \times 10^6$ g mol⁻¹ e $4,7 \times 10^6$ g mol⁻¹, sendo utilizados como recebidos. Os solventes usados foram água deionizada (milli-Q) para preparar soluções de PEO e PAM, e n-heptano (Merch) para soluções de PIB.

As soluções poliméricas foram preparadas por gravimetria em balança analítica. Uma solução estoque foi preparada e deixada em repouso por um dia para que o polímero pudesse intumescer; após este período, esta solução foi diluída nas concentrações desejadas e colocadas num banho termostático a $(25,00 \pm 0,01)$ °C por aproximadamente 48 horas antes da realização dos experimentos.

2.2. Medidas Reológicas

As curvas de fluxo das soluções foram obtidas no reômetro rotacional (modelo RheoStress 1 da Haake) utilizando como acessório o sistema de cilindros concêntricos tipo “double-gap” (modelo DG 43 Ti). Os experimentos foram conduzidos com taxas de deformação entre 0 e 3900 s⁻¹. O volume de amostra utilizado foi de 11,5 mL. Os experimentos foram conduzidos na temperatura de 25°C.

Para avaliar efeitos térmicos sobre as soluções de PEO 5×10^6 g mol⁻¹, 20 ppm, foram feitos estudos nas temperaturas de 15, 25, 35 e 45 ($\pm 0,01$) °C, sendo mantidas por um banho termostático (Haake DC 30) acoplado ao reômetro.

3. Resultados e Discussões

3.1. Redução de Atrito Hidrodinâmico e as Curvas de Fluxo

Curvas típicas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para água e soluções poliméricas de PAM e PEO podem ser observadas na Figura 2.

Considerando a Figura 2, observa-se que, para baixas taxas de cisalhamento (menores que 400 s⁻¹) são observadas dependências lineares entre tensão e taxa de cisalhamento para água, por ser um fluido Newtoniano e, para as soluções poliméricas, que, por estarem muito diluídas, se comportam como fluidos Newtonianos. Em torno de 500 s⁻¹, a tensão de cisalhamento para todos os sistemas estudados aumenta, e isto se deve a entrada no regime turbulento. O fluxo mais caótico requer maior energia (torque) para manter o sistema escoando. Para taxas de cisalhamento até 1500 s⁻¹, as curvas para a água e para as soluções poliméricas se sobrepõem. Acima de 1500 s⁻¹, a tensão de cisalhamento medida para as soluções poliméricas tem uma discreta diminuição em relação à da água pura, sendo que a diferença aumenta a medida que maiores taxas de cisalhamento são aplicadas (Figura 2, à direita). Isto significa que, para as soluções poliméricas, numa dada velocidade rotacional, o torque requerido para girar o rotor é menor. Os resultados mostrados na Figura 2 podem ser melhor visualizados se gráficos da viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento são considerados (Figura 3).

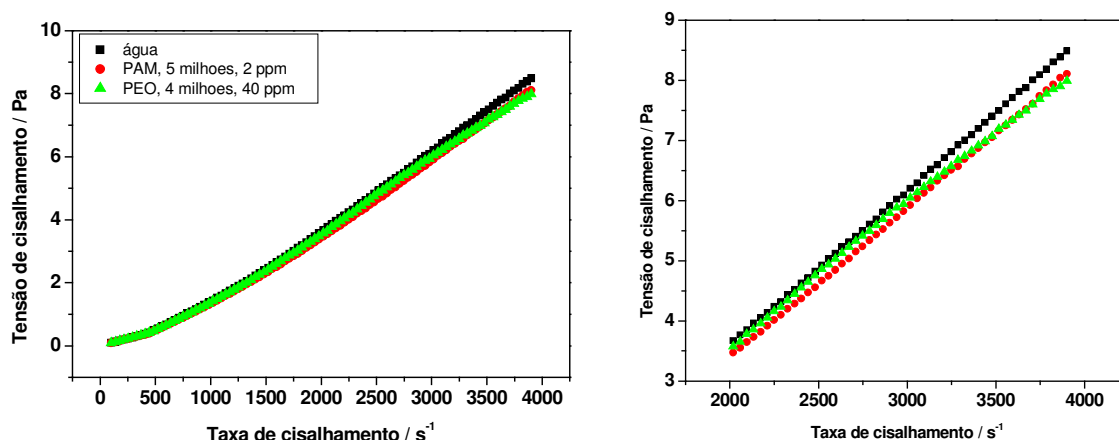


Figura 2. Variação da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para água e soluções poliméricas de PAM, $5 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$, 2 ppm e PEO $4 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$, 40 ppm. À esquerda está mostrada toda a extensão da curva de fluxo no intervalo de 100 a 3900 s^{-1} . À direita está mostrada parte da curva (de 2000 a 3900 s^{-1}) para melhor visualização do efeito redutor de atrito nas soluções poliméricas.

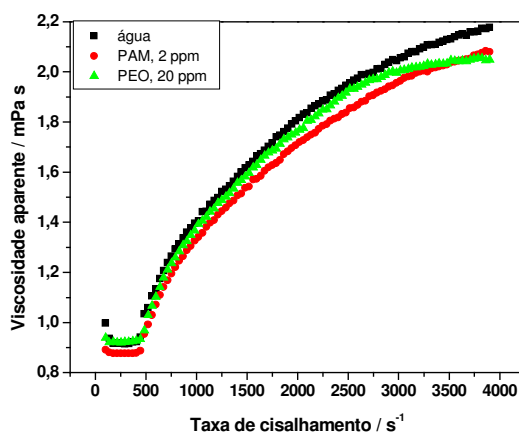


Figura 3. Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para água e soluções poliméricas de PAM e PEO.

A partir de determinada taxa de cisalhamento (“onset point”), a viscosidade aparente das soluções poliméricas é sempre menor do que a da água pura, como resultado do efeito de redução de atrito. Ao mesmo tempo em que populações de micro-vórtices são geradas e crescem, no caso das soluções poliméricas, as cadeias sofrem estiramentos. A interação das cadeias com os vórtices resulta na absorção elástica de suas energias. Sob elevado cisalhamento, as soluções poliméricas apresentam elevado grau de orientação das macromoléculas caracterizadas pela viscosidade elongacional. A Figura 3 mostra que o comportamento das duas soluções poliméricas (PEO e PAM), é diferente ao longo da faixa de taxa de cisalhamento estudada. As viscosidades aparentes para as soluções de PAM são menores que para as de PEO. Para taxas maiores que 3000 s^{-1} , a viscosidade aparente da solução de PEO diminui significativamente. As diferenças observadas entre os dois polímeros podem estar intrinsicamente relacionados com as características das cadeias de PEO e PAM. Esta conclusão é reforçada pelo fato de que, apesar de que no caso estudado, ambos os polímeros apresentem aproximadamente a mesma massa molecular, magnitudes iguais de redução de atrito são obtidas com concentrações de PAM aproximadamente 10 vezes menores que as de PEO.

3.2. Efeito de Massa Molecular e Concentração Polimérica em Sistemas Aquosos

A Teoria de De Gennes indica que os vórtices possuem uma distribuição de tamanho e de frequência (com que são formados), e para que o efeito da redução de atrito seja maximizado, é necessário analisar algumas variáveis como massa molecular e concentração do polímero. Os resultados dos estudos com soluções de PEO numa ampla faixa de

massa molecular em concentrações de 0 a 100 ppm estão apresentados na Figura 4. Os estudos correspondem à viscosidade aparente medida na taxa de cisalhamento máxima atingida pelo reômetro, que é de 3900 s^{-1} , portanto na situação de maior turbulência.

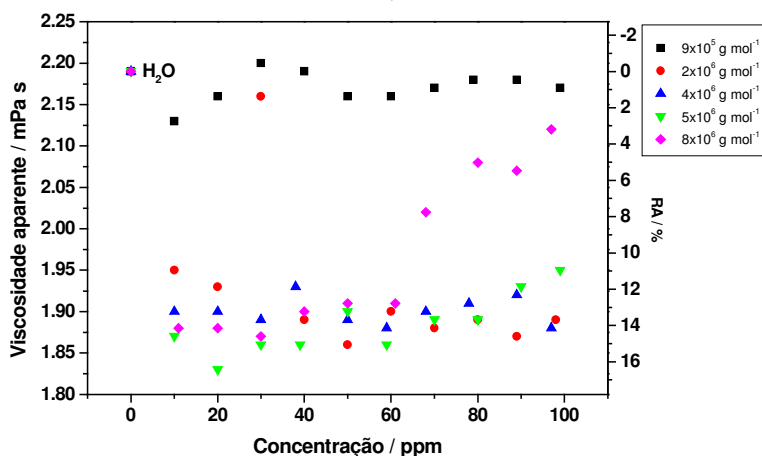


Figura 4. Viscosidade aparente (medida em 3900 s^{-1}) em função da concentração de PEO de diferentes massas moleculares. O primeiro ponto em 0 ppm, ao lado do qual está escrito H_2O , se refere a viscosidade aparente da água pura em 3900 s^{-1} e, foi colocado para efeito de comparação. A porcentagem de redução de atrito hidrodinâmico também está indicada no eixo oposto.

Com relação ao tamanho da cadeia polimérica, que está diretamente relacionada com a massa molecular, pode-se observar que com exceção do PEO $9 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$, todos os outros PEO estudados agem de forma significativa na redução do atrito hidrodinâmico (entre 10 e 14%). Considerando a Teoria Elástica de De Gennes, a ineficácia do PEO $9 \times 10^5 \text{ g mol}^{-1}$, pode estar associada com o pequeno tamanho deste polímero, que por não ter o mesmo tamanho dos vórtices gerados, não impede o truncamento da cascata dos mesmos.

Para as outras massas moleculares estudadas, não há uma dependência pronunciada com a concentração do polímero. Porém, para PEO $8 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ a eficácia da redução de atrito é diminuída a partir de 70 ppm, devido ao fato do aumento significativo da viscosidade (de cisalhamento) para concentrações maiores. Nas condições experimentais estudadas, a combinação que produz maior índice de redução de atrito é a solução de PEO $5 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ na concentração de 20 ppm (em torno de 16 %).

3.3. Efeito de Massa Molecular e Concentração Polimérica em Sistemas Orgânicos

Os estudos em fluidos orgânicos foram concentrados nos sistemas poliisobutileno (PIB)/n-heptano. A Figura 5 mostra que ocorre redução de atrito em soluções contendo PIB $4,7 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ em n-heptano; entretanto nenhum efeito é verificado para PIB $1,2 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$. Considerando também os resultados com PEO, fica evidente que comprimento e extensão da cadeia polimérica são parâmetros importantes no fenômeno de redução de atrito. No caso dos sistemas contendo PIB $4,7 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$, observou-se que a redução de atrito hidrodinâmico aumenta com o aumento da concentração do polímero até um máximo em 100 ppm, sendo que a porcentagem de redução de atrito medida foi de 18% em 3900 s^{-1} . Para concentrações maiores do que 100 ppm de PIB, a porcentagem de redução de atrito torna-se cada vez menor, indicando que os efeitos viscosos da adição do polímero tornam-se significativos quando comparados com os efeitos de redução de atrito.

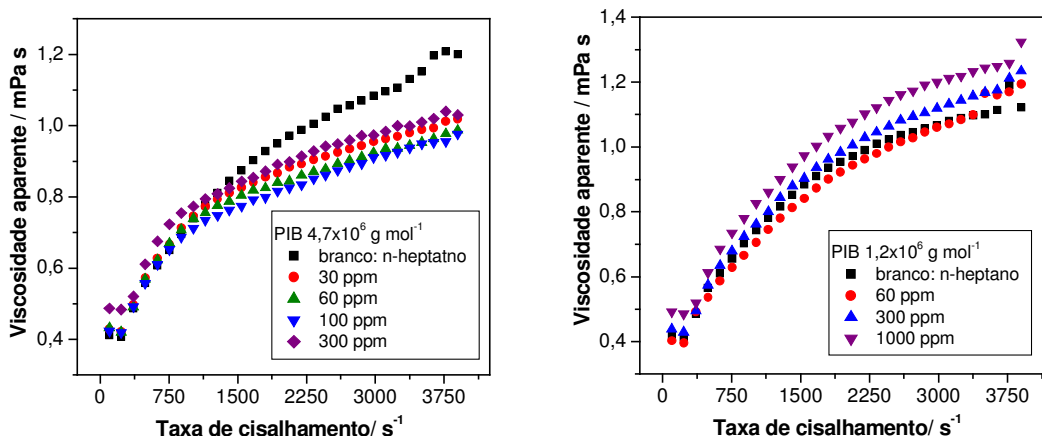


Figura 5. Viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento para soluções de PIB $4,7 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ e $1,2 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ em n-heptano em diferentes concentrações .

3.4. Efeito da Temperatura

As viscosidades do solvente e das soluções poliméricas são diretamente afetadas pela temperatura, alterando dessa forma todo regime de fluxo. Com o aumento da temperatura, a viscosidade do sistema diminui e a região turbulenta se inicia numa taxa de cisalhamento menor devido ao aumento da fluidez do sistema. Desta forma, o ponto em que as macromoléculas se estiram, produzindo a redução de atrito, tende a ocorrer numa taxa de cisalhamento mais baixa.

O efeito da temperatura foi estudado para soluções de PAM, 2 ppm e PEO 20 ppm, ambos $5 \times 10^6 \text{ g mol}^{-1}$, sendo que os índices de redução de atrito obtidos estão indicados na Tabela 1. Nas temperaturas estudadas, o efeito da degradação térmica é desprezível dentro do tempo de medida.

Tabela 1. Redução de atrito hidrodinâmico (RA) para soluções de PEO e PAM em função da temperatura na taxa de cisalhamento fixa de 3900 s^{-1} .

Sistema	Temperatura / °C			
	15	25	35	45
RA / %				
PEO	14	13	14	14
PAM	13	16	18	14

Pode-se observar na Tabela 1 que os índices de redução de atrito medidos em 3900 s^{-1} são pouco afetados pela variação da temperatura. A eficiência da PAM para reduzir o atrito hidrodinâmico aumenta ligeiramente para temperaturas maiores. Como discutido anteriormente, estas diferenças de comportamento podem ser atribuídas as características intrínsecas do polímero e sua interação com o solvente.

4. Conclusões

Os efeitos de redução de atrito hidrodinâmico causados por polímeros em sistemas aquosos e orgânicos podem ser estudados com bastante precisão usando um reômetro com acessório do tipo “double gap”. O processo de estiramento e contração das cadeias poliméricas em regime de fluxo turbulento é capaz de absorver elasticamente a energia dos micro-vórtices produzidos, resultando em menor dissipação de energia. O efeito torna-se mais pronunciado, a medida que o grau de turbulência (obtido com o aumento da taxa de cisalhamento) aumenta. Como previsto pela Teoria de De Gennes, os efeitos de extensão molecular e concentração polimérica foram observados em nossos experimentos com os diversos polímeros e, nos dois meios estudados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a UNICAMP, FAPESP e CNPq pelo apoio financeiro.

6. Referências

- ALKSCHBIRS, M. I.; BIZOTTO, V. C.; DE OLIVEIRA, M.; SABADINI, E.; Effects of Congo Red on the Drag Reduction Properties of Poly(ethylene oxide) in Aqueous Solution Based on Drop Impact Images, *Langmuir*, v. 20, p. 11315-11320, 2004.
- ANDREIS, M.; GRÄGER, H.; KOENING, J. L.; KÖTER, M.; KULICKE, W.-M.; *Advances in Polymer Science, Polymer Characterization/Polymer Solutions*, v. 89, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- BAILEY, F. E.; KOLESVE, J. V.; *Poli(ethylene oxide)*, Academic Press Inc., EUA, 1976.
- CHOI, H. J.; JHON, M. S.; Polymer-induced turbulent drag reduction. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 35, p. 2993-2998, 1996.
- CHOI, H. J.; KIM, C. A.; SOHN, J.; JHON M. S. An exponential decay function of polymer degradation in turbulent drag reduction. *Polym. Deg. Stability*, v. 69, p. 341-346, 2000.
- DE GENNES, P. G.; *Introduction to Polymer Dynamics*, Cambridge University Press, UK, 1990.
- FIGUEREDO, R. C. R.; SABADINI, E.; Firefighting foam stability: the effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide. *Colloids Surf. A*, v. 215, p. 77-86, 2003.
- GOODWIN, J. W.; HUGHES, R. W.; *Rheology for chemists-An introduction*, The Royal Society of Chemistry, UK, 2000.
- GROISMAN, A.; STEINBERG, V.; Couette-Taylor flow in a dilute polymer solution, *Phys. Rev. Lett.*, v. 77, p. 1480-1483, 1996.
- HERSHEY, H. C.; ZAKIN, J. L.; A molecular approach to predicting the onset of drag reduction in the turbulent flow of dilute polymer solutions, *Chem. Eng. Sci.*, v. 22, p. 1847, 1967.
- LUMLEY, J. L.; Drag reduction by additives, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 1, p. 367, 1969.
- MORGAN, S. E.; MCCORMICK, C. L.; Water-soluble copolymers. XXXII: Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure, *Prog. Poly. Sci.*, v. 15, p. 507-549, 1990.
- NAKKEN, T.; TANDE, M.; ELGSAETER, A.; Measurements of polymer induced drag reduction and polymer scission in Taylor flow using standard double-gap sample holders with axial symmetry. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, v. 97, p. 1-12, 2001.
- NAKKEN, T.; TANDE, M.; NYSTRÖM, B.; Effects of molar mass, concentration and thermodynamic conditions on polymer-induced flow drag reduction. *Euro. Polym. J.*, v. 40, p. 181-186, 2004.
- ROUSE JR., P. E.; A theory of the linear viscoelastic properties of dilute solutions of coiling polymers, *J. Chem. Phys.*, v. 21, p. 1272-1280, 1953.
- SABADINI, E.; ALKSCHBIRS, M. I.; Drag reduction studied by splashing visualization, *J. Visualization*, v. 4, p. 217-222, 2001.
- SABADINI, E.; ALKSCHBIRS, M. I.; Drag reduction in polymer solutions based on splash visualization, *Exp. Fluids*, v. 33, p. 242-248, 2002.
- SABADINI, E.; ALKSCHBIRS, M. I.; Drag reduction of poly(ethylene oxide) aqueous solutions based on drop impact images, *J. Phys. Chem. B*, v. 108, p. 1183-1188, 2004.
- ZIMM, B. H.; Dynamics of polymer molecules in dilute solution: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss, *J. Chem. Phys.*, v. 24, p. 269-278, 1956.