2
Histórico e revisão da literatura

Nesta seção será apresentada uma revisão concisa do histórico e da literatura existente no campo da redução de atrito através do uso de polímeros. Como o número de trabalhos publicados sobre o tema é grande, foi feita uma seleção daqueles considerados mais relevantes.

2.1
Histórico

O uso de polímeros de cadeia longa, dissolvidos em água ou solventes orgânicos pode reduzir dramaticamente a queda de pressão por atrito em escoamentos turbulentos. Em tubulações, por exemplo, experimentos já demonstraram que a perda por atrito pode ser reduzida em até 80% com a dissolução de algumas partes por milhão (ppm) do polímero no fluido [8].

A descoberta do fenômeno de redução do atrito através da adição de polímeros é atribuída a Toms [13]. Ele verificou este efeito por casualidade em 1946, quando investigava de fato a degradação mecânica de moléculas de polímero utilizando uma seção de teste tubular. Toms observou que uma solução de polímero oferecia menos resistência ao escoamento do que o solvente por si só.

Deste então a redução de atrito por adição polímeros tem sido uma área de intensa investigação, como pode ser verificado pelos trabalhos de den Toonder [5], [7] e [8], Li [10], Draad [6], Hoyt [9], entre outros.

O efeito de redução do atrito é extremamente interessante de um ponto de vista prático. Considerando o transporte de líquidos em tubulações, e a redução do atrito obtida com a adição de uma pequena quantia de polímero, é possível obter grandes vantagens econômicas e energéticas.

O sucesso mais espetacular em aplicações de polímero para redução de atrito foi, provavelmente, o uso de polímeros solúveis em óleo no oleoduto trans-Alasca, onde se obteve um ganho de 32.000 m^3/dia na vazão escoada. Neste exemplo, o polímero é injetado a jusante das estações de bombeio. As concentrações de polímero eram da ordem de 10 ppm. Além da redução de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

atrito, o polímero também causa uma redução na taxa de transferência de calor, o que era vantajoso no caso do oleoduto trans-Alasca, pois colaborava na redução da viscosidade do óleo bombeado.

2.2
Revisão conceitual

O fenômeno de redução de atrito foi estudado experimentalmente principalmente em canais e tubos. Nestes casos, a redução de atrito se manifesta como uma mudança na relação entre a variação de pressão (∆P) e a vazão do escoamento (Q). Observa-se uma redução na razão ∆P/Q com o uso de polímeros. Isto significa que para um mesmo ∆P observa-se uma maior vazão no duto, e em contra partida, se mantivermos a vazão, é observada uma redução no ∆P. Isto implica em vários modos de definir a redução de atrito dependendo da forma de medição. Apresentam-se abaixo duas formas de se quantificar percentualmente a redução de atrito DR (*Drag Reduction*) com a adição de polímeros:

$$DR_Q = \left(1 - \frac{\Delta P_p}{\Delta P_s}\right) \times 100\% \text{ , a vazão constante;} \quad (1)$$

ou,

$$DR_P = \left(1 - \frac{Q_s}{Q_p}\right) \times 100\% \text{ ,a pressão constante.} \quad (2)$$

Nessas equações o subscrito P representa a solução com polímero, e o subscrito S representa o solvente puro.

Na literatura, podem-se encontrar outras formas de definição. Substituindo-se o uso do ∆P, muitas vezes utiliza-se a definição do f (fator de atrito) para quantificar a redução de atrito. Para baixo Reynolds, escoamentos laminares, a adição de polímeros não tem influência na queda de pressão. Portanto, tanto para o solvente, quanto para a solução com diluição de polímeros, vale a lei de Poiseuille para tubos:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}} \tag{3}$$

Após a transição do escoamento para o regime turbulento, para um Reynolds menor que 10^5, um fluido Newtoniano segue a equação empírica de Blasius para tubo liso:

$$f = 0{,}316 \cdot \mathrm{Re}^{\frac{-1}{4}} \tag{4}$$

Porém, para uma solução com polímeros, a equação acima só é valida até um certo número de Reynolds. Para Reynolds mais elevados, o fator de atrito correspondente será menor para a solução com polímeros, indicando uma redução no atrito. Esta redução é influenciada por diversos fatores como: a concentração do polímero, o tipo de solvente, o tipo de polímero e o diâmetro da tubulação. Além disso, já foi provado experimentalmente [5] que existe uma máxima redução de atrito com o uso de polímeros. A Figura 2.1 ilustra a redução no fator de atrito que se pode obter com o uso de polímeros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

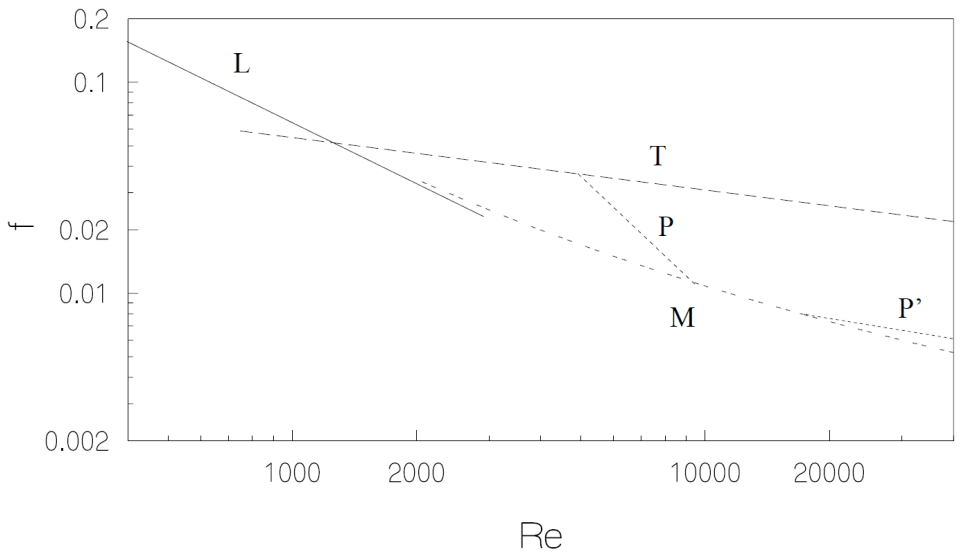


Figura 2.1 – Redução no fator de atrito em função do Reynolds apresentada por den Toonder [5].

Observa-se na Figura 2.1 que a curva T representa o solvente puro, a curva P representa a redução no fator de atrito com a utilização de polímeros e a curva M, representa a redução máxima que se pode conseguir com a adição de polímeros. Dependendo das características do solvente e do polímero, a redução de atrito pode ser mais intensa (aproximando-se da curva M), ou a transição P pode ocorrer em um Reynolds mais baixo.

Para permitir o estudo da adição de polímeros para a redução de atrito e dos mecanismos que governam o efeito, é indispensável a medição das grandezas que caracterizam a turbulência no escoamento com boa exatidão. Até 1970 as medições de velocidade utilizavam anemômetros de fio quente e tubo de Pitot. É sabido que a interação entre estas técnicas de medição e o polímero pode gerar erros consideráveis. O desenvolvimento de técnicas de medição de velocidade como o LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) e o PIV (*Particle Image Velocimetry*) tornou possível a medição do escoamento sem interferência direta. Isso fez com que essas técnicas fossem largamente utilizadas em estudos de redução de atrito.

Experimentos, que serão melhor descritos na seção 2.3, têm mostrado que a influência da adição de polímeros nos perfis médios de velocidade ocorre principalmente na camada de transição (*Buffer Layer*) [10]. Não há alterações na subcamada viscosa para a adição de pequenas quantidades de polímero. A principal alteração do perfil de velocidades ocorre na camada de transição. O alargamento da camada de transição que é observado gera um deslocamento do perfil na camada logarítmica. Portanto, na camada logarítmica a adição de polímeros gera um aumento das velocidades o que é condizente com a redução de atrito observada. Comumente os estudos experimentais sobre o tema vêm mostrando que deslocamento paralelo do perfil em coordenadas de parede. Este efeito será descrito com mais detalhes na seção 2.3.

Outra importante propriedade do escoamento é o valor *rms* (*root mean square)* das flutuações das velocidades, ou velocidade turbulenta. Estudos experimentais vêm mostrando que o pico das flutuações ocorre mais afastado da parede do que em um escoamento newtoniano. Além disso, a maioria dos estudos mostra um aumento no pico de flutuações [5].

A tensão de Reynolds é reduzida com a presença de polímeros [11]. Isto indica que, de alguma forma, os polímeros agem reduzindo a correlação entre as flutuações de velocidade axiais e normais do escoamento. A maioria dos trabalhos apresenta um déficit na tensão. Isto significa que o perfil de tensões de Reynolds adicionado ao perfil de tensões viscosas não gera a variação linear esperada da tensão total. Isto indica que o polímero tem grande contribuição no perfil de tensões.

Alguns experimentos com injeção localizada de polímero foram realizados para estudar a dependência da redução de atrito com a localização do polímero no escoamento. Nestes experimentos era realizada a injeção controlada do polímero em regiões conhecidas e medidas as propriedades do escoamento em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

diversos pontos a jusante do ponto de injeção. Toonder [5] cita experimentos realizados por McComb e Rabie em 1982 que concluíram que o polímero interagia com o escoamento em uma região próxima à parede (15 > y^+ > 100). Posteriormente Tiederman, citado por Toonder [5], concluiu que a zona eficaz de atuação do polímero é ligeiramente mais próxima à parede (10 > $y+$ > 100). Com isso ficou claro que a subcamada viscosa não tem participação na redução de atrito pela adição de polímeros.

2.3
Revisão bibliográfica

Conforme já dito anteriormente, o efeito da redução de atrito já foi largamente estudado em laboratório, porém ainda não há uma unanimidade em relação ao mecanismo real que ocasiona o fenômeno. Há na realidade algumas teorias principais para explicar o fenômeno. Toonder [5] em seu trabalho cita as teorias propostas por Oldroyd, Elperdin e Massah.

A primeira delas foi apresentada por Oldroyd onde foi proposto um comportamento anômalo na subcamada laminar próxima à parede do duto quando o escoamento é turbulento. A teoria era baseada na hipótese que as longas cadeias de polímero giravam próximas às paredes, formando uma camada de deslizamento, reduzindo assim o atrito. Experimentos posteriores demonstraram que essa camada não existe e que este efeito não ocorre.

Outra teoria foi proposta por Elperdin. Foi sugerido que os polímeros poderiam acumular-se nas paredes do duto, e que isto poderia provocar um deslizamento, reduzir a turbulência e minimizar a formação de vórtices junto às paredes, reduzindo assim a queda de pressão. Mais uma vez, experimentos posteriores comprovaram que esta não poderia ser a causa para a redução de atrito.

Estudos mais recentes têm indicado que o principal efeito da redução de atrito tem como origem a interação entre o fluido e o polímero. O fato de o efeito só ser observado a partir de um certo valor do número de Reynolds, é reflexo desta interação. Toonder [5] cita Virk que postulou que a redução de atrito ocorre quando a relação entre o comprimento das estruturas turbulentas e da cadeia polimérica atinge um valor crítico. Lumley considerou esta teoria improvável já que a menor estrutura turbulenta é muitas vezes maior que o comprimento da molécula de polímero. Como alternativa propôs que o fenômeno ocorre a partir de determinada razão entre o período das flutuações de velocidade e o tempo de relaxação da molécula de polímero. Esta hipótese foi, posteriormente, verificada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

experimentalmente. Lumely propôs que o aumento da viscosidade localizada nas regiões sujeitas às maiores deformações (onde preferencialmente o polímero se expande) poderia ser a chave para a redução de atrito. A principal região seria a região de transição onde ocorre intensa turbulência.

Outra importante teoria citada por Toonder [5] foi proposta por Landahl que analisou o efeito através de modelagem de escoamentos turbulentos simplificados. Seu estudo aponta para a importância dos efeitos anisotrópicos, entre tensão e deformação gerados no escoamento pela extensão do polímero no escoamento. A grande limitação neste caso está o uso de modelagem bi-dimensional enquanto que a turbulência é um efeito essencialmente tri-dimensional.

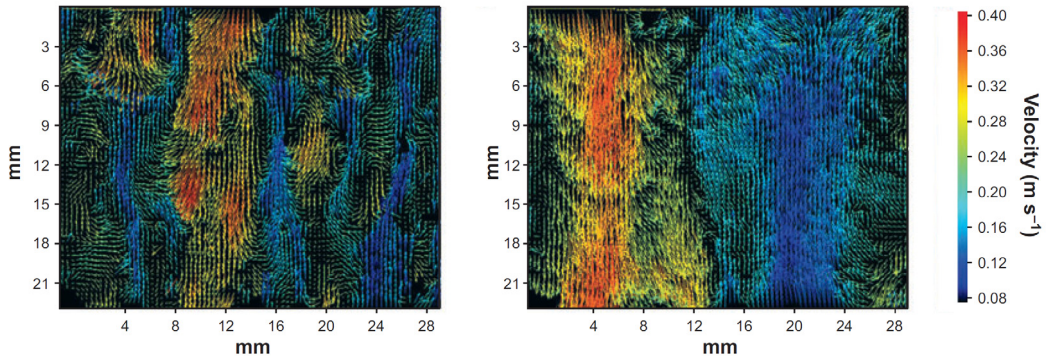
Uma ferramenta utilizada nos últimos anos para o estudo deste fenômeno é a simulação numérica direta ou DNS (*Direct Numerical Simulation*). Esta técnica tem a vantagem de não fazer aproximações para a turbulência, de forma que a atenção pode ser concentrada exclusivamente sobre polímero. Toonder [5] cita estudos realizados por Massah em 1993 modelaram o comportamento de uma única molécula de polímero no escoamento. Neste estudo, foram analisados somente os efeitos gerados pelo escoamento no polímero. No entanto, a conclusão foi de que é possível associar-se a redução de atrito à presença de polímeros na subcamada viscosa e às modificações na configuração do polímero na camada de transição. Handler, citado por Toonder [5], modelou o escoamento com redução de atrito e obteve resultados coerentes com experimentos realizados. Neste estudo a conclusão foi de que a redução de atrito esta associada à destruição da coerência das flutuações de velocidade pela formação de estruturas próximas às paredes.

Toonder [5] conclui que as teorias que explicam o efeito da redução de atrito podem ser divididas em três categorias principais. Em primeiro lugar a explicação na qual o incremento na viscosidade extensional da solução é o principal ingrediente. A segunda teoria destaca os efeitos anisotrópicos proporcionados pela adição das longas cadeias de polímero. E finalmente a proposição de que efeitos elásticos são responsáveis pela redução do atrito.

Esforços têm sido realizados no sentido de entender os mecanismos de redução de atrito para permitir a previsão do efeito. White [4] apresenta em seu trabalho uma visão geral dos estudos, experimentais e de simulação, e seus impactos no entendimento da redução de atrito. A Figura 2.2 apresenta uma imagem gerada por PIV das flutuações de velocidade no escoamento sobre

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

placa plana. Fica claro que a presença do polímero tem grande efeito sobre as a estrutura do escoamento turbulento na região próxima à parede.



(a) (b)

Figura 2.2 – Comparação entre a estrutura do escoamento turbulento próxima à parede para escoamento sobre placa plana para água sem a adição de polímero (a) e água com a adição de polímero (b). Medições realizadas com a técnica PIV e obtidas do trabalho de White [4] .

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

As principais diferenças nas estruturas turbulentas próximas às paredes entre o escoamento de fluido newtoniano e com polímero são descrita por White [4] da seguinte forma. Como consequência da redução do atrito na parede, o perfil médio de velocidades se modifica principalmente na camada de transição. Este efeito altera a natureza e a intensidade dos vórtices formados, o que resulta em uma mudança significativa na estrutura da camada turbulenta próxima à parede. A questão a ser respondida, segundo White, é como essas modificações nos perfis do escoamento estão relacionadas à redução de atrito observada.

White diz que toda a atividade ocorrida após a descoberta de Toms produziu evidências experimentais suficientes para concluir que os fundamentos do mecanismo físico da redução de atrito envolvem a interação dinâmica entre polímero e turbulência. Segundo White, dois resultados trazem a evidência básica. O primeiro deles é o fato de que não é observada redução de atrito significativa com adição de polímeros em escoamentos laminares. O segundo é que, para um dado diâmetro, o número de Reynolds onde o efeito é primeiramente observado depende do número de monômeros na macromolécula. Isto indica interação já que, em geral, a dinâmica da turbulência depende fundamentalmente do número de Reynolds enquanto que a dinâmica do polímero depende fundamentalmente do número de monômeros. A Figura 2.3 ilustra as características básicas de uma molécula de polímero sujeita à deformação pelo escoamento.

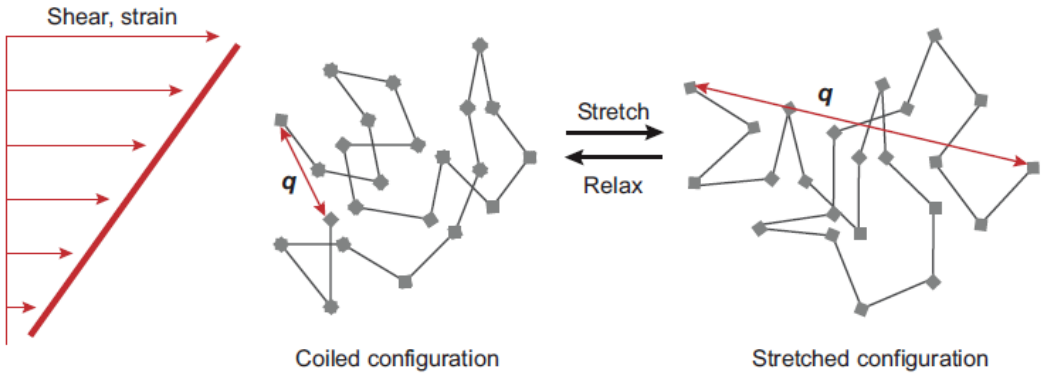


Figura 2.3 – Esquema da estrutura básica de uma molécula de polímero sujeita a deformação (retirada de White [4])

Outra importante referência vem do trabalho de Hoyt [9] onde o autor verificou que a região do escoamento mais próxima da parede é dominada por estruturas, que quando tornadas visíveis aparecem como vórtices longitudinais (*streaks)* de baixa velocidade. Essas estruturas ocorrem de forma densa, aleatória.

A Figura 2.4 abaixo representa um possível mecanismo de formação dos *streaks* largamente aceito na literatura. No entanto, a forma pela qual os vórtices são formados, e se estes ocorrem antes, após, ou conjuntamente com os *streaks* é um ponto de profunda discussão entre pesquisadores.

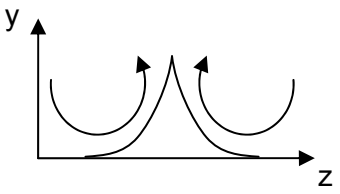


Figura 2.4 – Representação largamente aceita como o provável mecanismo de formação dos streaks. (retirada de Hoyt [9])

Foi observado que o espaçamento entre os *streaks* para um escoamento com adição de polímeros redutores de atrito é substancialmente maior que para um escoamento de fluido newtoniano.

Os *streaks* terminam quando se desprendem da parede, oscilam e finalmente se desintegram. A taxa de desintegração é reduzida na solução com polímeros a cinqüenta por cento ou mais quando comparada ao caso sem polímero. Acredita-se que a ejeção (*bursting)* é a maior fonte de flutuação de velocidades $\overline{u'v'}$, ocorrendo na camada de transição em $y+$ de 30 a 35. Segundo Hoyt, a influência da adição de polímeros no espaçamento entre os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

streaks, na taxa de desintegração e nas flutuações de velocidade, aparenta ser responsável por sua ampla capacidade de redução de atrito

A adição de polímeros, além de inibir a intensidade das flutuações de velocidade u' e v', reduz sua correlação. O curioso, segundo Hoyt, é que a tensão de Reynolds ($\overline{u'v'}$) pode ser reduzida a valores insignificantes, enquanto que a redução de atrito se limita a um máximo de 60% a 80%. Os polímeros parecem agir rompendo a interação entre os movimentos verticais e axiais das flutuações de velocidade. Em outras palavras, as velocidades axial e transversal se tornam independentes e a redução de atrito não é tão grande quanto a redução da componente $\overline{u'v'}$ das flutuações de velocidade.

O trabalho de Li [10] utilizou a técnica de PIV estereoscópico para avaliar a formação de vórtices longitudinais em escoamentos com adição de polímeros para redução do atrito. Li observou que no escoamento com polímeros os vórtices longitudinais são mais longos e que o espaçamento entre eles se torna em torno de 46% maior. Foi observada uma significativa redução na intensidade de turbulência da velocidade radial na camada de transição com o uso de polímeros, enquanto que para a camada logarítmica, a intensidade de turbulência sofreu pouca alteração. Isto indica que a redução da intensidade de turbulência na camada de transição pode ser o efeito mais significativo para a redução do atrito.

Um trabalho mais recente publicado por Procaccia [11] analisa uma série de resultados experimentais no intuito de tecer uma teoria para explicar o fenômeno da redução de atrito pela adição de polímeros. Segundo Procaccia, entender que o fluxo de momento do centro do tubo para a parede está diretamente relacionado ao atrito é o primeiro passo para decifrar o fenômeno da redução de atrito. Como a adição de polímeros normalmente tende a aumentar a viscosidade do fluido, não é intuitivo que eles tragam algum benefício ao escoamento, a não ser que se entenda que a principal razão para a redução de atrito é causada pela redução do fluxo de momento (ou tensão de Reynolds) para a parede. Procaccia cita a teoria de Gennes, que explica a redução de atrito pelo acúmulo e liberação de energia pelas moléculas de polímero. Como esse mecanismo não poderia mudar o fluxo de energia ele não poderia ser a causa da redução de atrito. A teoria de Lumley de 1969, que postula que polímeros interagem com a turbulência quando o seu tempo de relaxação é da ordem do período das flutuações de velocidade, permanece válida.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

A maior parte dos trabalhos nesta área busca identificar possíveis diferenças microscópicas entre o escoamento de fluidos newtonianos e fluidos com polímeros. Essa abordagem trouxe pouco avanço teórico. Já Procaccia baseou suas considerações na análise de modelos, equações e suas conseqüências.

A Figura 2.5 apresenta os perfis médios de velocidade em função da distância da parede para resultados experimentais e teóricos. Nessa figura, Procaccia apresenta sua teoria para o que chama de MDR (*Maximum Drag Reduction*) ou a máxima redução de atrito que se pode obter através do uso de polímeros.

Observando os perfis médios de velocidade é fácil verificar que a teoria proposta por Gennes baseada na redução de atrito através de mudanças na viscosidade não procede já que os perfis são escritos em coordenadas reduzidas e que mudanças na viscosidade causariam somente uma reparametrização do perfil. A redução de atrito deve significar uma mudança no perfil médio de velocidade, de forma que, a velocidade no escoamento com polímeros exceda as velocidades do perfil newtoniano.

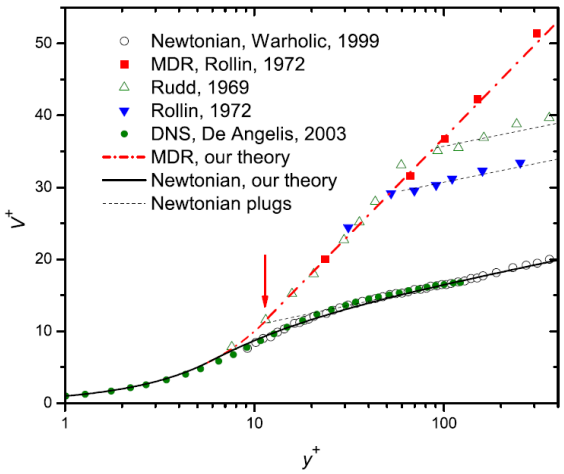


Figura 2.5 – Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos (retirada de Procaccia [11]).

Para valores de Reynolds suficientemente altos, altas concentrações de polímero e polímeros de cadeia longa, em teoria, poderia ser atingida uma condição de redução máxima do atrito (MDR). Procaccia explica esta condição como um estado do escoamento entre o regime laminar e turbulento. Nesse estado, as flutuações de velocidade praticamente não contribuem para o fluxo de momentos e seu único papel passa a ser a extensão dos polímeros. Procaccia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

concluiu que o principal mecanismo de redução de atrito através da adição de polímeros é a redução do fluxo de momento do centro para as paredes do tubo.

Como pode ser observado na revisão da literatura apresentada, existe um grande número de trabalhos realizados sobre o tema de redução de atrito por adição de polímeros. As referências recentes indicam que o assunto ainda é alvo de investigação, fruto da disponibilidade de novas técnicas experimentais e numéricas que abrem novas possibilidades de entendimento dos pontos ainda considerados controversos sobre o efeito do polímero no escoamento turbulento. O interesse atual no tema também pode ser creditado ao fato que o estudo da redução de atrito envolve, em última análise, o entendimento do escoamento turbulento, tópico onde há grande atividade de pesquisa.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da redução de atrito por adição de polímeros, iniciando uma linha de pesquisa no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC - Rio no assunto, onde serão utilizadas técnicas ópticas avançadas para determinar detalhes do escoamento turbulento. O trabalho realizado é descrito em detalhes nos capítulos que se seguem.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA