2
Revisão Bibliográfica

2.1.
Histórico

O fenômeno de redução de atrito através da adição de polímeros, (descoberto por Toms em 1948), tem recebido atenção porque sugere benefícios práticos com grandes vantagens econômicas e energéticas, tais como aumento da capacidade de transporte em dutos e navios mais rápidos, sendo também teoricamente estimulante, nas áreas de turbulência e reologia.

As observações de Toms e o efeito sobre a estrutura de escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos têm sido confirmados em muitas pesquisas posteriores como pode ser verificado pelos trabalhos de Lumey[13], Virk [29], [30] e [31], Den Toonder [7] e [8], Gyr & Bewersford [9], Mungal & White [6], Ptasinski [18], Warholic[32], entre outros.

As principais alterações nesta estrutura incluem um amortecimento de pequenas escalas espaciais da turbulência, maior velocidade longitudinal e redução das tensões de Reynolds. A redução de atrito é também caracterizada por um deslocamento para cima da região logarítmica do perfil de velocidade média (DR menos de 40%). Este regime é chamado de baixa redução de atrito (LDR regime). Em altas reduções de atrito (HDR), observa-se uma mudança na inclinação da lei universal logarítmica.

Além dessas mudanças na estrutura turbulenta, existe uma relação crítica das escalas de tempo do polímero e do escoamento para o início do fenômeno. Um aspecto importante na redução de atrito é a existência de uma aparente assíntota máxima de redução de atrito (MDR) que é bastante independente do tipo de polímero utilizado e das condições de escoamento.

As seções seguintes abordam uma revisão da redução de atrito com polímero e os esforços feitos para a compreensão do fenômeno.

2.2. Revisão Conceitual

A redução de atrito na presença de aditivos foi descoberta ao se observar uma diminuição na queda de pressão num tubo enquanto estava submetido à mesma vazão volumétrica.

As forças presentes no escoamento num tubo são: as forças normais que mantém o escoamento e as forças tangenciais que se opõem ao escoamento. Os polímeros minimizam as forças tangenciais facilitando o escoamento. A definição de redução de atrito proposta por Lumey (1969) [13] é:

"Redução de atrito é a redução da tensão de cisalhamento na parede e conseqüentemente, no fator de atrito da solução polimérica, a valores inferiores à tensão de cisalhamento do solvente".

Portanto, a redução de atrito, DR, é obtida pela relação entre a tensão de cisalhamento na parede, da solução polimérica, sendo representada pelo sufixo "P" (τ_{wP}) e, do solvente, sendo representada pelo sufixo "S" (τ_{wS}):

$$DR = \frac{\tau_{wP}}{\tau_{wS}} \qquad (2\text{-}1)$$

Considerando um balanço de forças em um escoamento turbulento totalmente desenvolvido através de um tubo reto, com diâmetro D, a tensão de cisalhamento na parede, τ_w, para fluidos newtonianos ou não-newtonianos, e para todos os regimes de escoamento é dada por:

$$\tau_w = \frac{D}{4}\frac{\Delta P}{\Delta x} \qquad (2\text{-}2)$$

onde $\Delta P / \Delta x$ é o gradiente de pressão axial constante. A tensão de cisalhamento na parede é normalmente expressa em termos do fator de atrito Fanning *f* dado por

$$f = \frac{4\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_b^2} \qquad (2\text{-}3)$$

onde U_b é a velocidade média no tubo e ρ é a massa específica.

No caso de canais e tubos, a redução de atrito se manifesta como uma mudança na relação entre a variação de pressão (ΔP) e a vazão do escoamento (Q). Observa-se uma redução na razão $\Delta P/Q$ com o uso de polímeros. Apresentam-se abaixo duas formas de se quantificar percentualmente a redução de atrito, DR, com a adição de polímeros:

$$DR_Q = \left(1 - \frac{\Delta P_p}{\Delta P_s}\right) \times 100\%$$, a vazão constante; (2-4)

ou,

$$DR_P = \left(1 - \frac{Q_s}{Q_p}\right) \times 100\%$$,a pressão constante. (2-5)

Substituindo-se o uso do ΔP, muitas vezes utiliza-se a definição do *f* fator de atrito para quantificar a redução de atrito.

Para baixos números de Reynolds, escoamentos laminares, a adição de polímeros não tem influência no atrito. Portanto, tanto para o solvente, quanto para a solução com diluição de polímeros, vale a lei de Poiseuille para tubos, que fornece:

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$ (2-6)

Após a transição do escoamento para o regime turbulento para tubo liso, para um Reynolds menor que 10^5, o fator de atrito para o escoamento de um fluido Newtoniano é bem representado pela equação empírica de Blasius,

$$f = 0{,}316 \cdot \mathrm{Re}^{-\frac{1}{4}}$$ (2-7)

onde Re é o número de Reynolds baseado na viscosidade η constante do fluido.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U_b D}{\eta}$$ (2-8)

O grau de redução de atrito observado depende de diversos fatores como, a concentração do polímero, o tipo de solvente, o tipo de polímero, o peso molecular do polímero, o diâmetro da tubulação e as próprias condições do escoamento. A redução de atrito aumenta com o incremento da concentração polimérica, até atingir o valor da Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (MDR) proposta por Virk [29], valor a partir do qual maiores concentrações de polímero não produzem mais efeito redutor. Esta assíntota é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{2}{\sqrt{f}} = 19{,}0 \log_{10}\left(\frac{1}{2}\mathrm{Re}\sqrt{f}\right) - 32{,}4$$ (2-9)

O comportamento do fator de atrito em um escoamento em um tubo pode ser representado em função do número de Reynolds como se apresenta na Figura 2.1. Essas curvas referem-se a escoamento de fluido em tubos com paredes lisas. O fator de atrito para o escoamento laminar está representado pela curva 1 (equação 2-6). A curva 2 representa o comportamento do fator de atrito para escoamento turbulento liso (equação 2-7), e a curva 3 representa a redução máxima que se pode conseguir com a adição de polímeros (equação 2-9). As curvas obtidas através da adição de polímeros devem se situar entre lãs curvas 2 e 3 apresentadas na Figura 2.1.

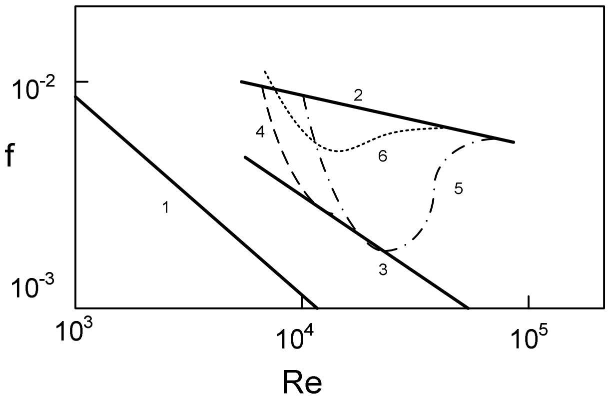


Figura 2.1 – Representação do fator de atrito em função de Reynolds (1) escoamento laminar; (2) escoamento turbulento em tubos lisos; (3) assíntota de máxima redução de atrito de Virk; (4), (5) e (6) três típicos comportamentos para soluções poliméricas [9].

2.2.1. Equações Básicas

Considerando que o fluido consiste em um solvente newtoniano misturado com uma pequena quantidade de polímeros, as equações básicas que descrevem este escoamento incompressível são dadas pela equação da continuidade e a equação do momento linear:

$$\underline{\nabla}.\underline{u} = 0 \tag{2-10}$$

$$\rho \frac{D\underline{u}}{Dt} \equiv \rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \rho \underline{u} \cdot \underline{\nabla} \underline{u} = -\underline{\nabla} p + \underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\tau}} \tag{2-11}$$

Em estas equações $\underline{u}$ é o vetor velocidade, p é a pressão e $\underline{\underline{\tau}}$ é o tensor de tensões. $D\underline{u}/Dt$ denota a derivada material.

A tensão total é decomposta em uma parte do solvente (newtoniana) e uma parte polimérica (não-newtonianos) de acordo com:

$$\underline{\underline{\tau}} = \underline{\underline{\tau}}_s + \underline{\underline{\tau}}_p \tag{2-12}$$

A contribuição da parte do solvente para o tensor da tensão $\underline{\underline{\tau}}_s$ é descrita pela equação constitutiva de um fluido Newtoniano.

$$\underline{\underline{\tau}}_s = 2\mu \underline{\underline{D}} \tag{2-13}$$

onde é μ a viscosidade dinâmica, $D = \left(\nabla \underline{u} + (\nabla \underline{u})^T\right) / 2$ é o tensor taxa de deformação. Para a tensão por parte do polímero $\underline{\underline{\tau}}_p$ uma equação que leva em conta as caracteristicas do fluido deve ser fornecida.

Sabendo que a turbulência é um estado flutuante e caótico do movimento de um fluido que existe quando em um fluxo não-linear, os efeitos de inércia predominam sobre os efeitos viscosos, é comum que as grandezas sejam descritas estatisticamente pela decomposição de todas as quantidades em uma média e uma parte flutuante, ou seja, parte turbulenta.

$$\underline{u} = \overline{\underline{u}} + \underline{u}' \tag{2-14}$$

$$\underline{p} = \overline{\underline{p}} + \underline{p}' \tag{2-15}$$

$$\underline{\underline{\tau}}_p = \overline{\underline{\underline{\tau}}}_p + \underline{\underline{\tau}}'_p \tag{2-16}$$

Onde, $\overline{\underline{u}}$ e $\overline{\underline{p}}$ são a média da velocidade e da pressão, respectivamente, e $\underline{u}'$ e $\underline{p}'$ são suas flutuações turbulentas. Os fluxos turbulentos são caracterizados por as flutuações da velocidade.

Substituindo as Equações. (2-14), (2-15) e (2-16) nas Equações. (2-10) e (2-11) obtemos:

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{U} = 0 \tag{2-17}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \underline{U}}{\partial t} + \underline{U} \cdot \underline{\nabla U} + \underline{\nabla} \cdot \overline{\underline{u}'\underline{u}'}\right) = -\underline{\nabla} P + \mu \underline{\nabla}^2 \underline{U} + \underline{\nabla} \cdot \overline{\underline{\underline{\tau}}}_p \tag{2-18}$$

Na equação anterior aparece o chamado tensor de tensão de Reynolds ($\rho \overline{\underline{u}'\underline{u}'}$) que é a contribuição do movimento turbulento ao tensor de tensão média.

Como vamos estudar o fluxo turbulento em um tubo, é conveniente reescrever a Eq. (2-18) em termos de coordenadas cilíndricas. Nós usamos um sistema de coordenadas cilíndrico (x, r, θ) para o axial, radial e tangencial respectivamente. Considerando que o escoamento está completamente desenvolvido e que a única componente da velocidade não nula é a componente axial e que todas as estatísticas são só função de r, obtemos a seguinte equação:

$$0 = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(\rho \overline{u'_x u'_r} - \mu \frac{dU_x}{dr} - \tau_{p,rx} \right)\right) \tag{2-19}$$

Multiplicando a equação (2-19) por *r* e integrando de *0* a *r* da o seguinte resultado:

$$-\frac{r}{2}\frac{dP}{dz} = \rho \overline{u'_x u'_r} - \mu \frac{dU_x}{dr} - \tau_{p,rx} \tag{2-20}$$

Sabendo que r=D/2 e substituindo na Eq. (2-19) temos que:

$$-\frac{D}{4}\frac{dP}{dz} = \rho \overline{u'_x u'_r} - \mu \frac{dU_x}{dr} - \tau_{p,rx} \equiv \tau_w \tag{2-21}$$

onde τ_w é a tensão de cisalhamento média total na parede

A equação da energia cinética para o fluxo médio, $(1/2)\rho U_i U_i$, pode ser escrita como:

$$0 = \underbrace{-U_x \frac{\partial P}{\partial x}}_{\text{Pu}} + \underbrace{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{ rU_x \left(-\rho \left\langle \overline{u'_x u'_r} \right\rangle + \mu \frac{\partial U_x}{\partial r} + \tau_{p,rx} \right)\right\}}_{\text{Tu}} + \underbrace{\rho \left\langle \overline{u'_x u'_r} \right\rangle \frac{\partial U_x}{\partial r}}_{\text{Du}} \underbrace{- \mu \left(\frac{\partial U_x}{\partial r} \right)^2}_{\text{Es}} \underbrace{- \tau_{p,rx} \frac{\partial U_x}{\partial r}}_{\text{Ep}} \tag{2-22}$$

Esta equação é integrada sobre a seção transversal de modo a obter um balanço sobre a seção inteira. P_u é a produção média de energia de fluxo imposta pelo gradiente de pressão. Os três termos em T_u descrevem o transporte médio do fluxo de energia respectivamente pelas tensões de Reynolds, viscosidade média e a média de tensões poliméricas. D_u é a trnsferencia de energia do escoamento médio para as flutuações turbulentas e torna-se o termo de produção na equação (2-23) para a energia cinética turbulenta. E_s é a dissipação viscosa por o fluxo médio e E_p é a dissipação pela tensão polimérica media.

A equação para a energia cinética da turbulência, $(1/2)\rho \langle u'_i u'_i \rangle$, é:

$$0 = \underbrace{-\rho \left\langle \overline{u'_x u'_r} \right\rangle \frac{\partial U_x}{\partial r}}_{\text{Pk}} + \underbrace{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{ r\left(-\frac{1}{2}\rho \left\langle \overline{u'_r u'_i u'_i} \right\rangle - \left\langle \overline{p' u'_r} \right\rangle + \frac{1}{2}\mu \frac{\partial}{\partial r}\left\langle \overline{u'_i u'_i} \right\rangle + \left\langle \overline{u'_i \tau'_{p,ir}} \right\rangle \right)\right\}}_{\text{Tk}} \underbrace{- \mu \left\langle \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \right\rangle}_{\varepsilon\text{s}} \underbrace{- \left\langle \overline{\tau'_{p,ij} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \right\rangle}_{\varepsilon\text{p}} \tag{2-23}$$

Aqui, P_k é a produção de energia cinética turbulenta. Se P_k =-D_u encontramos P_k que é positivo. Os quatro termos do T_k resultam novamente na redistribuição da energia cinética turbulenta e não contribuem para o balanço quando se integra ao longo do tubo seção. Eles representam o transporte devido a flutuações de velocidade, a flutuações de pressão, a flutuações da tensão viscosa e a flutuações da tensão polimérica, respectivamente. Os dois últimos termos são a dissipação viscosa (solvente) e o trabalho da tensão polimérica.

Para fluxos turbulentos de fluidos newtonianos em um duto uma análise dimensional pode apresentar uma idéia clara sobre a forma do perfil de velocidade média na região perto da parede [24]. Para isto, é conveniente representar o perfil médio adimensional de velocidades em coordenadas de parede y^+ e com velocidades normalizadas pela velocidade de atrito, u_τ. A relação entre a velocidade axial média e a distância à parede, $y=(D/2)-r$, é igual:

$$U^+ = f\left(y^+\right) \tag{2-24}$$

onde,

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \tag{2-25}$$

com,

$$u_\tau = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2-26}$$

onde ρ é a densidade do fluido e τ_w é a tensão de cisalhamento média na parede e,

$$y^+ = \frac{y.u_\tau}{\nu} \tag{2-27}$$

Na Figura 2.2 é apresentada a lei da parede, para fluido Newtoniano. Para a subcamada viscosa:

$$U^+ = y^+ \quad \text{se } 0 < y^+ < 5, \tag{2-28}$$

e para a camada logarítmica:

$$U^+ = 2.5\ln y^+ + 5.5 \quad \text{se } y^+ > 30 \tag{2-29}$$

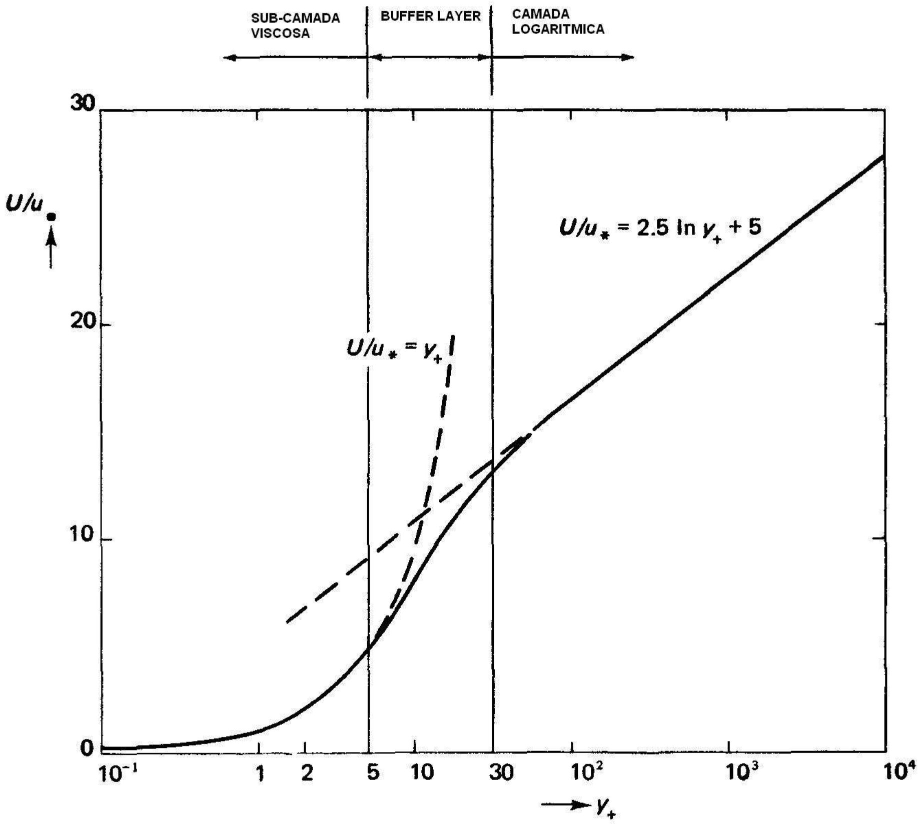


Figura 2.2 – Representação esquemática dos perfis de velocidade [24].

2.3. Revisão da Literatura

Uma recente revisão do trabalho realizado até hoje em DR polímero é dada por White & Mungal (2008) [6].

Os aditivos que causam a redução de atrito podem ser divididos em três grupos: polímeros, surfactantes e fibras. Uma descrição detalhada do fenômeno da redução de atrito é dada por Gyr & Bewersford [9]. Neste trabalho, nos restringiremos a estudar a redução de atrito em fluxo turbulento em tubo por adição de polímeros, que são dissolvidos em água.

Segundo Lumley (1969) [13], que foi um dos primeiros a propor uma análise do mecanismo de DR, a redução de atrito está associada com as mudanças nas escalas de turbulência, devido à presença dos aditivos. Lumley postulou que a extensão das moléculas de polímeros tem efeito fora da subcamada laminar, produzindo um aumento da viscosidade efetiva nessa região. Den Toonder et. al.(1995) [7] em seu trabalho propõe que o mecanismo de redução de atrito pode ser atribuído a anisotropia da viscosidade por causa do estiramento das macromoléculas pelo escoamento.

Em trabalhos mais recentes como o de White [6] se conclui que os fundamentos do mecanismo físico da redução de atrito envolvem a interação dinâmica entre polímero e turbulência, devido ao fato de que não é observada redução de atrito significativa com adição de polímeros em escoamentos laminares e que a interação da dinâmica da turbulência depende fundamentalmente do número de Reynolds enquanto que a dinâmica do polímero depende fundamentalmente do número de manômeros. Para que a redução de atrito aconteça Lumey (1969) propôs o chamado critério de tempo de DR. O critério exige que o tempo de relaxamento do polímero deve ser superior a um período representativo da escala da turbulência perto da parede, em outras palavras, o DR ocorre quando a relação entre a escala de tempo de polímero com a escala de tempo de fluxo da turbulência na parede perto, definido como o número Weissenberg é de ordem da unidade ($We_\tau = \dfrac{T_z \rho u_\tau^2}{\mu_s}$, onde Tz é o tempo médio que leva para um polímero esticados para voltar a uma configuração enrolada, μ_s é a viscosidade da solução, ρ é a densidade da solução, u_τ é a velocidade de atrito nas paredes) [6]. Na Figura 2.3 se apresenta um polímero em estado de relaxamento e estirada pelo escoamento.

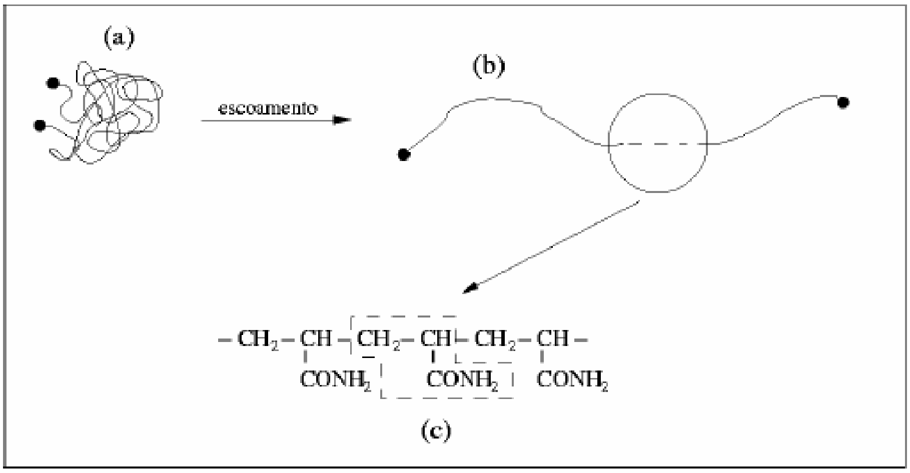


Figura 2.3 – Esquema de um polímero (e relaxamento), submetido a deformação. [4]

Vários trabalhos para comprovar estas teorias foram realizados, entre eles o de Andreotti [4] quem desenvolveu uma análise assintótica para investigar o efeito do estiramento de macromoléculas de polímeros de alto peso molecular no fenômeno de redução de atrito em escoamentos turbulentos concluindo que este fenômeno é uma conseqüência direta de uma resposta anisotrópica do escoamento a uma anisotropia de viscosidade induzida pela elongação de macromoléculas ou pela presença de fibras longas. Isto também foi apresentado em simulações numéricas diretas de fluidos viscoelásticos realizadas por Den Toonder [7].

Para um dado polímero e solvente, Virk (1975) [29] mostrou que a quantidade de polímero e o peso molecular, são os fatores de maior influência na redução de atrito. Normalmente, uma maior quantidade de polímero produz altos níveis de redução de atrito, até atingir a assíntota de redução máxima (MDR), conforme definido por Virk et. al. (1967) [30]. O MDR ocorre quando as tensões de Reynolds são fortemente diminuídas e o mecanismo que sustenta a turbulência é impulsionado principalmente pelo polímero. Além disso, a quantidade de polímero necessário para atingir MDR diminui com o aumento do peso molecular do polímero.

Assim, para limitar o custo que envolve a DR, pequenas quantidades de polímeros de alto peso molecular são desejáveis e este objetivo se tornou o ponto focal da maioria dos esforços de investigação atual da DR. No entanto, foi demonstrado por Patterson e Abernathy [17] que quando o comprimento da cadeia é aumentado os polímeros se tornam mais suscetíveis a degradação por cisalhamento de cadeia

Para Procaccia [19], 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 da tensão de Reynolds perto à parede. Esta redução é observada por Warholic [32], o qual encontra tensões de Reynolds de cerca de zero nas condições de MDR em um canal com o uso de velocimetria de imagens de partículas (PIV).

Lumley (1967) [13] mostrou que o mecanismo de DR ocorre na região da parede e precisamente na camada de amortecedora (*buffer layer*). Relacionaram a capacidade de redução de atrito de um polímero com a capacidade de armazenar energia por estiramento. Toonder [8] mostra que a camada de amortecimento é aumentada, o que implica que a região logarítmica é deslocada para cima de forma paralela com respeito a um escoamento de um fluido newtoniano. A maioria dos experimentos relatam que a mudança do perfil logarítmico é paralela ao traçado nas coordenadas semi-logarítmica. Virk [29] descobriu que no núcleo turbulento de uma solução com polímero, a velocidade segue a mesma inclinação da lei universal logarítmica que para um fluxo de um fluido newtoniano, mas com algum incremento na velocidade ΔB [9], ou seja:

$$U^{+} = 2{,}5 \ln y^{+} + 5{,}5 + \Delta B \tag{2-30}$$

Recentemente, alguns progressos no modelo de DR tem sido feito por Procaccia, L'vov & Benzi (2008) [19]. Eles forneceram uma explicação quantitativa da assíntota de redução de atrito máxima (MDR) que tem a seguinte forma:

$$U^{+} = 11{,}7 \ln y^{+} - 17 \tag{2-31}$$

White [6] confirma estes estudos concluindo que como conseqüência da redução do atrito na parede, o perfil médio de velocidades se modifica principalmente na camada de amortecimento. 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 (Figura 2.4)

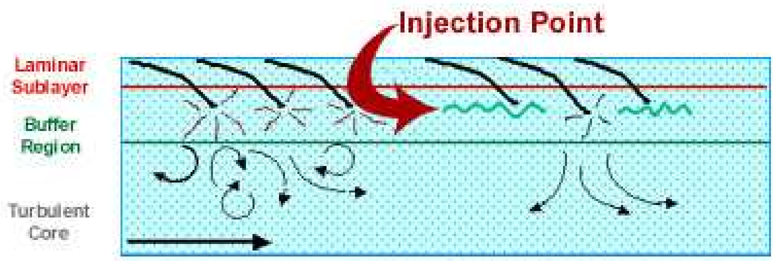


Figura 2.4 – Efeitos da adição do polímero na estrutura turbulenta [36]

Como já foi mencionada, a redução de atrito devido à adição de polímeros é função da concentração. Ptasinski (2001) [20] analisou a redução de atrito com polímeros em diferentes concentrações num tubo. Ele mostrou que os valores das flutuações de velocidades axiais aumentavam para baixas concentrações de polímeros e diminuíam chegando a valores próximos do solvente para maiores concentrações poliméricas, enquanto os valores de flutuações na direção normal caíam drasticamente contribuindo para a redução de atrito quando as concentrações do polímero são altas. Em trabalhos semelhantes, mostra-se que o pico das flutuações ocorre mais afastado da parede do que em um escoamento newtoniano (Toonder [8]). A Figura 2.5 apresenta os perfis médios de velocidade em função da distância da parede para resultados experimentais e teóricos.

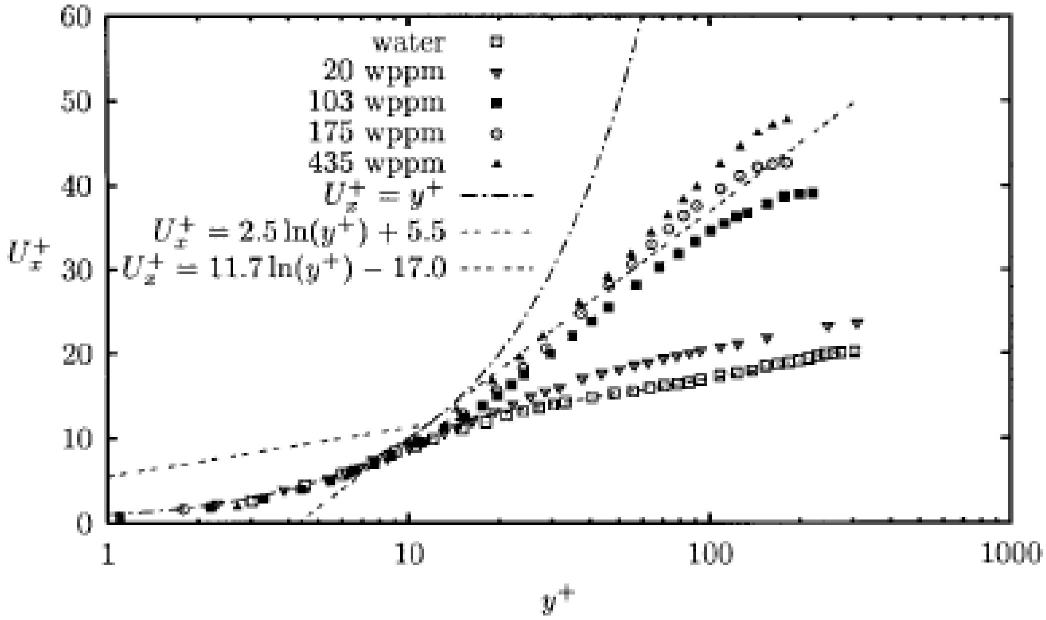
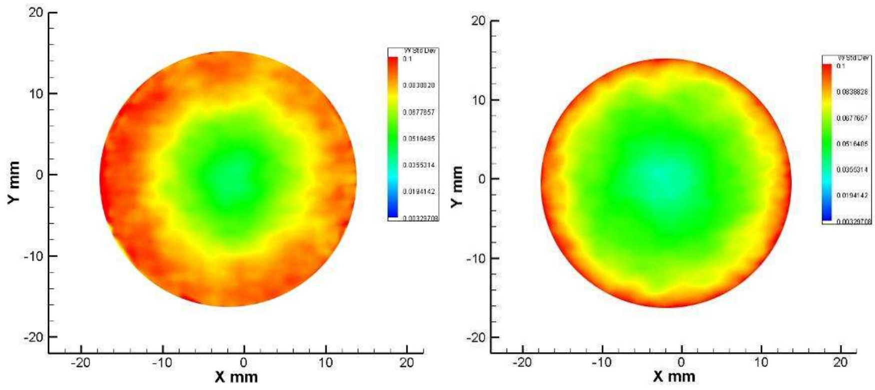


Figura 2.5 – Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos [20]

Além disso, Ptasinski [20] avaliou o balanço de cada componente da energia cinética turbulenta e descobriu que ao suprimir as flutuações de pressão o polímero impede a transferência de energia entre os diferentes componentes através da taxa de pressão de tensão nos balanços das tensões de Reynolds.

Li [12] usando a técnica de PIV estereoscópico para avaliar a formação de vórtices longitudinais em escoamentos com adição de polímeros para redução do atrito observou 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. Para Pakelet [16] que realizou um estudo recente da redução de atrito em dutos usando como técnica de medição do PIV, a intensidade se reduz em todas as direções, a exceção ocorre somente próximo à parede do duto. Na Figura 2.6 se apresenta o perfil de velocidade turbulenta na direção axial que, permite uma melhor visualização destas mudanças na intensidade de turbulência.



(a) (b)

Figura 2.6 - Perfis de velocidade turbulenta na direção axial w'_{RMS} em tubo de seção circular para: (a) Água a vazão de 60 l/min e Re = 4,23 X 10^4 e (b) Solução de polímero a vazão de 60 l/min, Re = 3,38 X 10^4 e DRQ de 31,1% [16]

Na revisão bibliográfica apresentada, mostra-se que o fenômeno da redução de atrito tem sido largamente estudado experimental e numericamente, porém ainda não há uma unanimidade sobre o efeito do polímero no escoamento turbulento, pelo qual no presente trabalho pretende-se com a ajuda das novas técnicas de medição, como o PIV, ter um melhor entendimento deste fenômeno e da turbulência.