

SADALLA DOMINGOS

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM CONDUTOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS
E SUA APLICAÇÃO ÀS ADUTORAS DE ÁGUA BRUTA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo

1994

SADALLA DOMINGOS

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM CONDUTOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS
E SUA APLICAÇÃO ÀS ADUTORAS DE ÁGUA BRUTA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador:
Prof^o Doutor Tufi Mamed Assy

São Paulo

1994

DEDICATÓRIA

**Aos meus pais, Tufi e Fargette,
aos meus filhos Thiago e Carolina e
a minha companheira Eliane.**

AGRADECIMENTOS

**Aos meus Sócios e Amigos da JNS em
especial a Mari, Erli, Ivanildo, Cássio,
Léia etc, etc.**

**REDUÇÃO DE ARRASTO EM CONDUTOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS E SUA
APLICAÇÃO ÀS ADUTORAS DE ÁGUA BRUTA**

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO

2. POLÍMEROS

2.1 Conceitos Fundamentais

2.1.1 Introdução

2.1.2 Nomenclatura de polímeros

2.1.3 Classificação de polímeros

2.1.4 As propriedades dos polímeros

2.1.5 Definição de pesos moleculares e viscosidades
dos polímeros

2.2 Tipos de Polímeros Solúveis em Água

2.2.1 Introdução

2.2.2 Biopolímeros

2.2.3 Polímeros sintéticos

2.3 O Comportamento Hidrodinâmico da Solução Polimérica

3. REDUÇÃO DE ARRASTO EM CONTUDOS

3.1 Introdução

3.2 Espectos Fenomenológicos da redução de arrasto

3.2.1 Os primeiros modelos de previsão da redução de arrasto

3.2.2 Modelos de previsão baseados na escala de comprimento das moléculas de polímero

3.2.3 Modelos de previsão baseados na escala de tempo das moléculas de polímero

3.2.4 Modelos de previsão baseados na energia do escoamento turbulento

3.2.5 Modelos de previsão baseados na multiplicidade dos mecanismos de redução de arrasto

3.3 Equacionamento do Fenômeno de redução de arrasto

3.4 Aplicações Atuais do Fenômeno de redução de arrasto

4. AS ADUTORAS DE ÁGUA BRUTA

4.1 Introdução

4.2 Polímeros como Aditivos do Processo de Tratamento de Águas de Abastecimento

4.3 Viabilidade de relocação do Ponto de Aplicação do Polímero com Dupla Função: Redução de Arrasto e Coagulantes ou Auxiliar de Flocculação

5. PROPOSTA DE ENSAIO EM ESCALA DE LABORATÓRIO

5.1 Objetivos

5.2 Descrição do Arranjo Básico das Instalações

5.3 Equipamentos e Procedimentos de Medição

6. CONCLUSÕES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Fotos com escoamentos em jato livre de água com e sem polímero
- Figura 2** - Determinação gráfica da viscosidade cinemática
- Figura 3** - Gráfico de f e Re . Influência da estrutura molecular da água no fenômeno de redução do arrasto: ensaio de copolímero acrilamida modificado com vários solventes
- Figura 4** - Gráfico representativo da tensão de cisalhamento na parede (τ) e taxa de deslizamento (du/dy) entre duas placas para fluidos newtonianos, fluidos não newtonianos e plásticos
- Figura 5** - Reograma da água e de solução água-poli(óxido de etileno) a duas concentrações
- Figura 6** - Reograma da água e solução água-goma "guar" para seis concentrações
- Figura 7** - Diagrama de Moody ($f \times Re$) para uma situação hipotética de redução de arrasto em condutos
- Figura 8** - Diagrama $f \times Re$ em condutos para soluções 10 ppm de água-poliacrilamida para diferentes pesos moleculares
- Figura 9** - Diagrama $f \times Re$ com início antecipado da redução de arrasto para polímeros de estruturas moleculares rígidas
- Figura 10** - Gráfico da Eficiência de redução do arrasto (ERA) em relação à concentração da solução polimérica, para três diferentes números de Reynolds
- Figura 11** - Diagrama adimensional de distribuição de velocidade a partir da parede de conduto, com e sem redução de arrasto
- Figura 12** - Regimes de escoamentos em condutos com redução de arrasto
- Figura 13** - Modelo de previsão da redução de arrasto segundo WALSH
- Figura 14** - Arranjo Básico das Instalações em Laboratório
- Figura 15** - Tomada de pressão

RESUMO

O tema desta dissertação refere-se à propriedade de redução de arrasto em escoamentos turbulentos mediante a adição de polímeros e aplicação deste fenômeno às adutoras de água bruta.

Inicialmente, foram definidos conceitos fundamentais, descritos tipos de polímeros solúveis em água e discutidos aspectos do comportamento dos escoamentos de soluções poliméricas.

Discute-se em seguida a fenomenologia da redução de arrasto, descrevendo os modelos de previsão disponíveis, as equações existentes e o conjunto de aplicações.

Ao descrever, na sequência, as adutoras de água bruta em sistema de abastecimento, cogita-se da possibilidade de analisar integradamente o sistema adução-tratamento, com a adição de polímeros não só para tratamento mas também para redução de arrasto nas adutoras.

É proposto arranjo geral de instalações de laboratório para ampla pesquisa das variáveis envolvidas no processo integrado adução-tratamento.

Conclui-se finalmente pela enorme potencialidade de aplicação deste fenômeno ao lado da disponibilização deste conhecimento aos pesquisadores.

ABSTRACT

The subject of this work relates to the characteristics of drag reduction in turbulent flows through the addition of polymers and the application of this phenomenon to raw water supply pipelines.

Initially it has been defined fundamental concepts and polymers types which are water soluble. Aspects of polymeric solutions flows behavior were discussed in the sequence.

It is then discussed the phenomenology of drag reduction by describing the available prevision models, the existing equations and the set of applications.

When we describe raw water supply pipelines we work on the possibility of analysing the behavior of the system pipeline-treatment with the addition of polymers not only for treatment but also for drag reduction.

It is proposed a general layout for one laboratory instalation to provide a wide research of the variables involved in the integrated process pipeline-treatment.

Finally it is possible to conclude about the enormous potentialities of this phenomenon application besides the disponibilization of these results to researchers.

1. INTRODUÇÃO

Adicionando certas substâncias a um escoamento turbulento, a resistência por atrito pode ser reduzida até a um quarto daquela do solvente puro. Essa redução do arrasto no escoamento turbulento pode causar valores menores do coeficiente de perda de carga distribuída e conseqüentemente, do coeficiente de atrito o que favorece uma menor queda de pressão por unidade de comprimento do conduto, ou uma redução de altura manométrica necessária para bombear uma dada vazão de um dado líquido ou impelir um objeto através do fluido. Neste trabalho, o arrasto é o de atrito e o coeficiente de perda de carga distribuída é o coeficiente f da fórmula de perda de carga, $h_f = fl/d v^2/2g$, ligado ao coeficiente de atrito C_f por $f = 4C_f$.

O Eng^o B. A. TOMS (1949) foi o primeiro a publicar dados sobre a redução da perda carga em condutos (fenômeno conhecido também como "efeito Toms"). Ele constatou coeficientes de atrito muito baixos para soluções diluídas do polímero polimetil metacrilato em solvente monoclorobenzeno, ao longo de um conduto com escoamento turbulento. O Sr. K.J.MYSELS (1949) observou um efeito semelhante para gasolina enriquecida com sabões de alumínio.

O estudo da redução da resistência do arrasto foi realmente iniciado no fim da década de cinquenta e início dos anos sessenta. Em 1959, apareceram simultaneamente, os resultados das dissertações para doutoramento do Sr. D.W.

DODGE, orientando do Prof. A.B. METZNER em Delaware, e do Sr. R.G. SHAVER, orientando do Prof. E.W. MERRILL no MIT. Ambos relatavam coeficientes de atrito extraordinariamente baixos para soluções diluídas de polímeros. Em seguida, pesquisadores na indústria petrolífera perceberam uma redução do atrito na goma "guar", areia, e suspensões aquosas usadas em perfurações de poços de petróleo. As contribuições iniciais e significativas foram feitas pelos pesquisadores da Marinha dos Estados Unidos J.W. HOYT, A.G. FABULA e colaboradores (1964). O Sr. FABULA e colaboradores (1963) descobriram as propriedades redutoras da resistência de arrasto do poli(óxido de etileno) que é o redutor de perda de carga mais estudado e comercialmente usado. A título de ilustração insere-se a seguir a Figura 1, que mostra as fotografias de um jato livre de água, saindo de um bocal, com e sem adição de polímero, notando-se a diferença de comportamento entre os dois escoamentos.

Esses primeiros estudos até 1964, assentaram as bases para milhares de investigações, teóricas e experimentais, sobre a redução da resistência ao arrasto, que surgiram ao longo dos últimos quarenta anos. Todavia, o fenômeno ainda não é plenamente compreendido; uma série de aspectos químicos, mecânicos e hidrodinâmicos da redução de arrasto e a conseqüente menor perda de carga, necessitam ainda ser mais estudados. A grande quantidade de publicações recentes neste

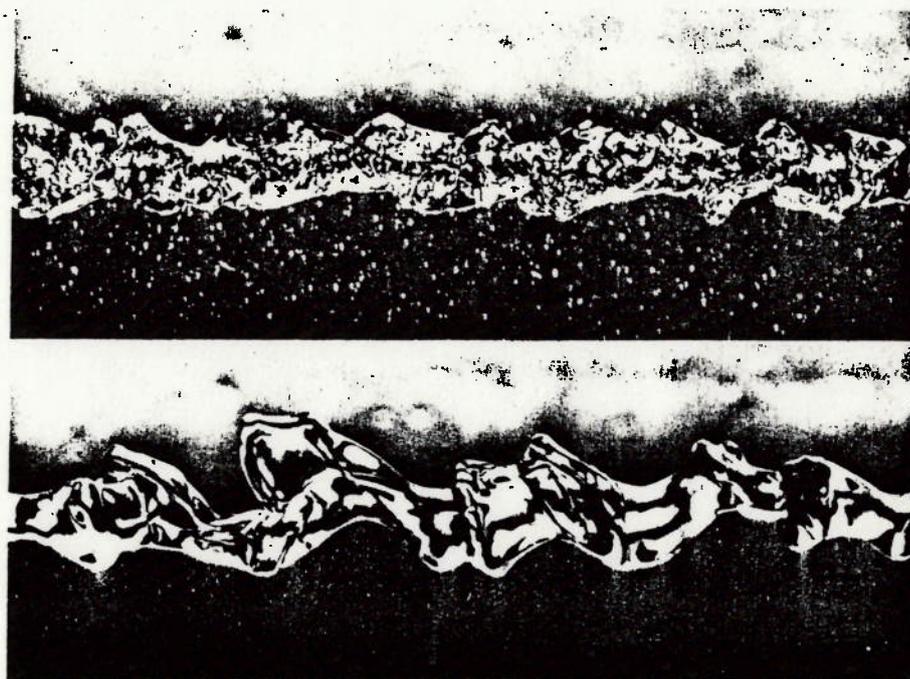


Figura 1 - Fotos com escoamentos em jato livre de água com e sem polímero (extraído de SELLIN, 1982)

campo atesta que a redução de arrasto continua a ser uma área fértil de pesquisa.

Não obstante este fato, verifica-se atualmente a existência de várias aplicações práticas das propriedades redutoras de arrasto de soluções poliméricas em oleodutos, hidroelétricas, controle de poluição, navegação, etc.

Esta dissertação de mestrado objetiva analisar a viabilidade de ampliar a gama de aplicações práticas deste fenômeno em sistemas de aproveitamentos hídricos, procurando

previamente consolidar o estágio atual do seu entendimento, equacionamento e aplicações.

Destaque-se finalmente que a bibliografia consultada, principalmente do Exterior, não permitiu ainda a adequação das notações aos critérios da disciplina de Mecânica de Flúidos, sendo porisso adotados a da própria bibliografia.

2. POLÍMEROS

2.1 Conceitos Fundamentais

2.1.1 Introdução

A profa. E.B.MANO (1985) e o Sr. N.BIKALES (1971), conceituam polímero a partir de suas propriedades. As propriedades das moléculas que se tornam muito grandes, que então se chamam então macromoléculas - ganham características próprias, gerais, muito mais dominantes do que as que decorrem da natureza química dos átomos que as constituem. Essas propriedades decorrem de interações envolvendo segmentos da mesma molécula ou de outras, da forma e do comprimento das ramificações presentes na cadeia molecular. Em soluções, essas interações entre macromoléculas, acarretam um pronunciado aumento da viscosidade, que não se observa com as micromoléculas. Da evaporação do solvente dessas soluções viscosas resulta a formação de filmes, e da evaporação de soluções de substâncias sólidas de micromoléculas originam-se cristais ou pós. Esse processo de evaporação é um dos meios mais simples e imediatos para o reconhecimento das macromoléculas: capacidade de formação de filmes ou películas (9) (32).

Conforme MANO (1985), encontram-se macromoléculas tanto como produtos de síntese, quanto como de origem natural. Os polissacarídeos, poli-hidrocarbonetos, proteínas e ácidos

nucléicos, todos constituem exemplos de macromoléculas naturais orgânicas, assim como amido, algodão, madeira, borracha de seringueira, etc. Os poliestireno e náilon são macromoléculas sintéticas orgânicas. O diamante, o grafite, a sílica e o asbesto, são produtos macromoleculares naturais inorgânicos. O ácido polifosfórico e o poli(cloreto de fosfonitrila) são produtos macromoleculares sintéticos inorgânicos".

"O termo "polímero" vem do grego ("muitas partes") e é indefinido, no sentido de que o menor comprimento ou tamanho de molécula não é especificado. Literalmente, qualquer molécula com algumas "partes", isto é, meros, pode ser chamada de "polímero". Entretanto, essa expressão é geralmente aceita como significando uma molécula muito maior, de tamanho tal que às propriedades associadas às moléculas de cadeia longa tenham-se tornado evidentes. Frequentemente se encontra a expressão alto polímero (high polymer) para chamar a atenção para o fato de que o polímero considerado tem, realmente, um elevado peso molecular. Os polímeros de baixo peso molecular são chamados oligômeros (também do grego, "poucas partes")".

Deve-se neste ponto recordar que Peso Molecular de uma espécie química, é quantas vezes a molécula é mais pesada do 1/12 do átomo do Carbono 12, fixado como valor 12 (NEHMI, 1965). Assim, o peso molecular da água, com dois átomos de

hidrogênio (peso atômico 1,00797) e um de oxigênio (peso atômico 15,9994) é 18,01588.

Conforme BIKALES (1971), "as propriedades especiais de moléculas muito grandes começam a surgir a partir de peso molecular da ordem de 1000-1500; essas propriedades começam a aparecer e se tornam mais evidentes à medida que o peso molecular aumenta. Alguns polímeros têm pesos moleculares até mesmo da ordem de milhões, porém a maioria dos polímeros que tem propriedades físicas úteis, do ponto de vista técnico, tem pesos moleculares da ordem de dezenas ou centenas de milhar".

MANO conceitua que "em contraste com as substâncias químicas comuns, os polímeros não são produtos homogêneos; contêm mistura de moléculas, de variados pesos moleculares, apresentando o que se chama de polimolecularidade. Devido à sua grande massa, não ocorrem, em geral, modificações fundamentais pela entrada ou retirada de alguns átomos ou grupos de átomos, ao contrário do que se observa nos compostos químicos usuais. O conceito de polímero puro é bem diferente daquele que se aplica à Química, já que não se obtêm, nem interessa obter, frações com absoluta uniformidade molecular, para qualquer finalidade de aplicação industrial".

Monômeros são compostos químicos que reagem para formar polímeros. A reação química que conduz à formação de polímeros é a polimerização.

Grau de polimerização é o número de meros da cadeia polimérica, entendendo-se por mero a unidade química repetida. Quando há mais de um tipo de mero na composição do polímero, este é designado por copolímero, e os monômeros que lhe dão origem, comonômeros.

Quando se deseja ressaltar o fato de que o polímero tem apenas um tipo de mero, usa-se a expressão homopolímero, em contraposição expressão de copolímero. Os copolímeros cujas unidades químicas não seguem qualquer ordenação, dispondo-se ao acaso, são chamados de copolímeros estatísticos. No outro extremo, quando há perfeita regularidade de constituição, dispondo-se as unidades químicas diferentes de modo alternado, são chamados de copolímeros alternados. Quando, ao invés de uma unidade química de cada tipo, alternam-se seqüências de unidades químicas iguais, o produto é denominado copolímero em bloco. No caso particular desses blocos existirem como ramificações poliméricas do esqueleto principal da macromolécula, o copolímero é dito "graftizado" ou enxertado (graft copolymer).

Segundo E.G.RICHARDS (1980), "os polímeros podem ter suas cadeias sem ramificações, - polímeros lineares - ou podem apresentar ramificações, cuja complexidade pode ir até formação de retículos, resultando uma estrutura molecular tridimensional. Como conseqüência, surgem propriedades diferentes no produto, especialmente em relação à viscosidade, fusibilidade ou a solubilidade.

2.1.2 Nomenclatura de polímeros

Segundo MANO (1985), três diferentes sistemas são empregados para a designação de polímeros, baseando-se no processo industrial, na estrutura do mero, ou em bases empíricas tradicionais.

O mais frequente é nominar o polímero segundo o processo industrial de repetição do monômero, basta colocar o prefixo poli. Exemplos são polietileno, polipropileno, etc. Quando o nome do monômero é uma expressão, esta deve ser contida entre parênteses, ou seja poli(metacrilato de metila), poli(acrilamida), etc.

O copolímero é caracterizado por ter mais de um tipo de unidade química repetida, isto é, mais de um tipo de mero. Quando se desconhece a seqüência, o copolímero é estatístico, sendo definido pelo prefixo co inserido entre os nomes dos meros. Exemplo: poli(estireno-co-metacrilato de metila), sendo em proporção maior o primeiro monômero enunciado, isto é, estireno. Se se conhece o tipo de seqüência, ele é designado intercalando-se os prefixos -alt. -b, ou -g-, que significam, respectivamente, alternado, bloco ou grafitizado (enxertado). Exemplos: poli(etileno-alt-monóxido de carbono); poli(metacrilato de metila-b-alfa-metil-estireno), com longos blocos de metacrilato de metila; poli(etileno-g-acrilonitrila), com suporte de polietileno para enxertos do mero acrilonitrila.

2.1.3 Classificação de polímeros

Segundo MANO (1985) e BIKALES (1971), as classificações mais comuns de polímeros envolvem a estrutura química, o método de preparação, as características tecnológicas e o comportamento mecânico.

De acordo com seu comportamento mecânico, os polímeros são divididos em três grandes grupos: borrachas ou elastômeros, plásticos ou fibras. Em sua síntese, esses termos envolvem a expressão resina.

A resina é uma substância amorfa ou uma mistura, de peso molecular intermediário ou alto, insolúvel em água, mas solúvel em alguns solventes orgânicos, e que, à temperatura ordinária, é sólida ou um líquido muito viscoso, que amolece gradualmente por aquecimento. Todas as resinas naturais são solúveis e fusíveis, e todos os polímeros sintéticos que obedecem às condições acima apontadas são também chamados de resinas sintéticas.

A borracha, ou o elastômero, é um material macromolecular exibindo elasticidade em um grande intervalo de tensões, à temperatura ambiente.

Os plásticos são materiais que contém, como componente principal, um polímero orgânico sintético; em algum estágio de seu processamento, embora sólidos à temperatura ambiente em seu estado final, tornam-se fluidos, passíveis de serem

moldados, por ação isolada ou conjunta de calor e pressão; esse ingrediente polimérico essencial é a resina sintética.

A fibra é um corpo que tem uma elevada razão entre o comprimento e as dimensões laterais, e é composto principalmente de macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente.

2.1.4 As propriedades dos polímeros

Segundo MANO (1985) e RICHARDS (1980), as propriedades dos polímeros dependem da natureza química dos monômeros, do processo de preparação empregado, e da técnica escolhida para essa preparação.

Estes fatores, ao definirem a conformação, peso molecular, estrutura molecular, etc do polímero, estabelecem suas propriedades químicas e físicas tais como viscosidade, solubilidade, fusibilidade, condutividade elétrica, etc.

Exemplificando, qualquer que seja o método de preparação do etileno, suas propriedades físicas e químicas são as mesmas. Entretanto, conforme o processo de polimerização, o polietileno resultante muda de características, passando de material flexível e macio a rígido e resistente, de aplicações bastante diferentes.

2.1.5 Definições dos pesos moleculares e viscosidades dos polímeros

Segundo RICHARDS (1980), o peso molecular dos polímeros depende também, das condições de polimerização, para cada monômero. Para uma mesma estrutura macromolecular, as propriedades dos polímeros variam progressivamente com o peso molecular; essa variação torna-se pouco expressiva quando esses pesos atingem ou excedem ordem de grandeza de 10^5 . Paralelamente a esse aumento, podem ser esperados aumentos na viscosidade de suas soluções, na capacidade de formação de filmes, no ponto de amolecimento, na resistência à tração, na resistência ao impacto, etc., bem como diminuição de solubilidade.

Como os polímeros não são substâncias "puras", no sentido usual do termo em Química, porém misturas de moléculas de diferentes pesos moleculares e mesmo diferentes estruturas, é importante conhecer a curva de distribuição desses pesos e o peso molecular médio do produto.

Os três principais tipos de peso molecular comumente referidos na referências já citadas são: peso molecular numérico médio, peso molecular ponderal médio e peso molecular viscométrico médio.

O peso molecular numérico médio (M_n) depende do número de moléculas; é dado pela expressão:

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} n_i M_i}{\sum_{i=1}^{\infty} n_i}$$

em que:

M_i = peso molecular de moléculas de classe i ;

n_i = número de moléculas de classe i .

O peso molecular numérico médio é geralmente obtido através de centrifugação, destilação, osmometria, etc.

O peso molecular ponderal médio (M_m) depende do número e do peso das moléculas presentes na solução do polímero e é obtido através da expressão

$$M_m = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} n_i M_i^2}{\sum_{i=1}^{\infty} n_i M_i}$$

O método direto mais usado para sua determinação é a difusão ou espalhamento de luz.

O peso molecular viscométrico médio (M_v) é uma propriedade da solução polimérica e se baseia na propriedade característica dos polímeros de produzirem soluções viscosas, mesmo a grandes diluições. Depende do espaço ocupado pelas macromoléculas, causando resistências ao escoamento, e são fatores importantes o número, o peso e a forma das moléculas. As interações polímero-solvente afetam os resultados obtidos. Pode-se representar M_v pela expressão:

$$M_v = \frac{\left[\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i^{1+a} \right]^{1/a}}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i M_i}$$

em que:

a = constante que depende do sistema polímero-solvente e da temperatura; quando $a = 1$, $M_v = M_n$.

Entretanto, na prática, obtêm-se os valores de M_v de modo diferente, através da equação abaixo, válida somente para polímeros de estrutura molecular linear:

$$[\eta] = KM^a$$

em que:

$[\eta]$ = viscosidade intrínseca;

a, K = constantes que dependem do sistema polímero-solvente e da temperatura.

Esses valores são obtidos através de viscosímetros. O mais prático é a medida da diferença de tempo entre o escoamento de igual volume de uma solução de polímero e de seu solvente, a temperatura constante, através de um capilar; os tempos devem ser de 100 a 200 s, e os pesos moleculares dos polímeros, devem estar na faixa de 10.000 a 1.000.000.

Há uma série de termos empregados em viscometria de polímeros. Os mais usados são:

$$\text{viscosidade absoluta, } \eta = \frac{t_d}{t_1 d_1}$$

$$\text{viscosidade relativa, } \eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{t}{t_0};$$

$$\text{viscosidade específica, } \eta_{sp} = \eta_r - 1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} = \frac{t - t_0}{t_0};$$

$$\text{viscosidade inerente, } \eta_{inh} = \frac{\ln \eta_r}{c} = \frac{2,3 \log t/t_0}{c};$$

$$\text{viscosidade intrínseca, } [\eta] = \lim [\eta_{inh}]_c = 0;$$

em que:

η = viscosidade absoluta da solução de polímero;

η_0 = viscosidade absoluta do solvente;

η_i = viscosidade absoluta do padrão de referência; para
água a 25°C, $\eta_i = 0,8937$ cp (centipoise);

t = tempo de escoamento do solvente no capilar;

t_0 = tempo de escoamento da solução no capilar;

t_i = tempo de escoamento do fluido padrão no capilar;

d = densidade da solução de polímero;

d_i = densidade do fluido padrão;

c = concentração da solução (massa por volume);

A expressão mais significativa é a viscosidade intrínseca, obtida graficamente fazendo-se pelo menos três determinações de viscosidade inerente, e extrapolando-se a

zero a reta obtida. Obtém-se o valor de $[\eta]$ sobre o eixo das ordenadas, conforme se observa na Fig. 2.

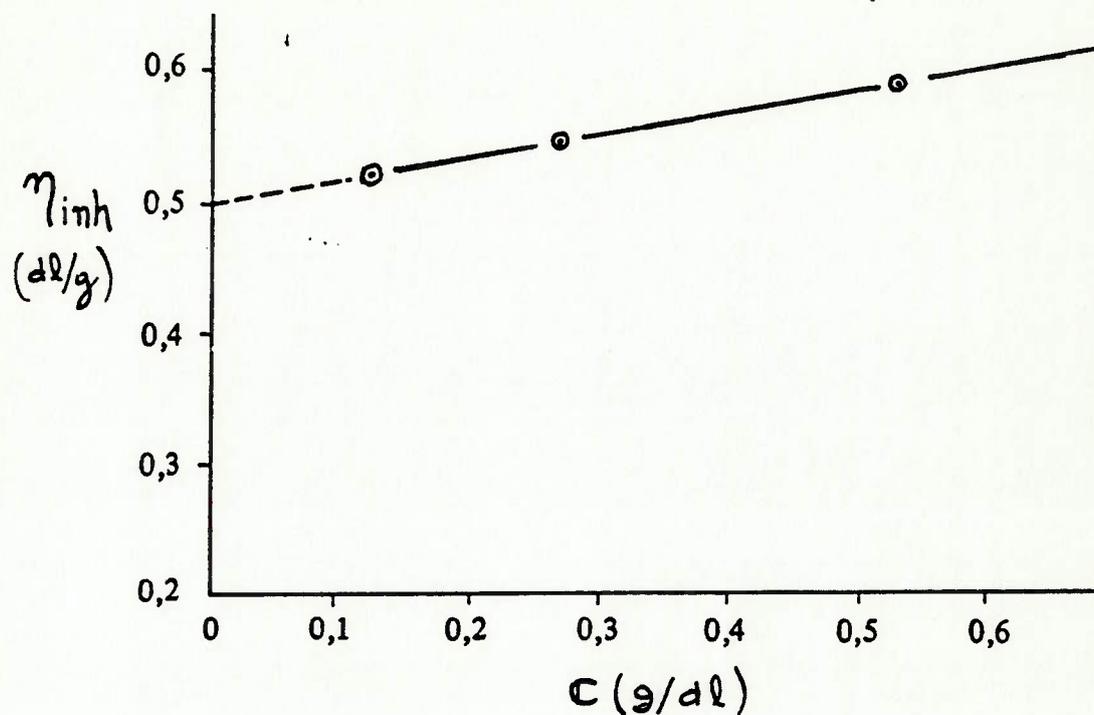


Figura 2 - Determinação gráfica da viscosidade cinemática (extraído de MANO, 1986)

2.2 Tipos de Polímeros Solúveis em Água

2.2.1 Introdução

Em soluções poliméricas redutoras de arrasto, o efeito do polímero sobre a estrutura do solvente pode ser tão importante quanto o efeito do solvente sobre a conformação do polímero, sobretudo se o solvente for água. A água é um líquido altamente ordenado por causa de sua natureza polar e de sua propensão a formar pontes de hidrogênio entre moléculas. O modelo "cachos oscilantes" do Sr. H.S.FRANK e

colaboradores (1958) é uma das teorias mais aceitas para descrição da estrutura da água. Nesse modelo, "cachos" de moléculas de água com pontes de hidrogênio, semelhantes ao gelo e de vida curta, são misturados com camadas de moléculas de água, sem pontes de hidrogênio. Todo o sistema é mantido unido por poderosas forças de Van der Waals. As pontes de hidrogênio rompem e se reconstituem, constantemente, produzindo cachos transitórios englobando moléculas diferentes por todo o fluido.

Adicionando qualquer soluto, modifica-se a estrutura da água. Íons e moléculas polares podem "quebrar" sozinhos a estrutura da água formando ligações de hidrogênio com moléculas de água, reduzindo assim o número disponível para ligação com outras moléculas de água. Moléculas não polares de soluto, por outro lado, induzem estruturas mais ordenadas ("icebergs") na água que as rodeia. Segundo FRANKS (1975), a "mudança da entropia negativa, implicada na formação de icebergs parece ser a força motora para a ligações hidrófobas em solução aquosa". A ligação hidrófoba, une os grupos hidrófobos, resultando em uma superfície hidrófoba menor, menor contato entre moléculas de água e hidrófobos e assim, a um menor número de icebergs circundantes.

Os achados dos professores C.L.MCCORMICK e S.E.MORGAN (1990), indicaram que a estrutura da água pode ser muito importante no fenômeno de redução do arrasto. A Fig. 3 mostra uma locação do coeficiente de perda de carga distribuída f ,

em função do número de Reynolds, para soluções de um copolímero acrilamida, hidrofobicamente modificado, no qual a concentração de polímero foi mantida constante mas variado o solvente. Os solventes usados foram água deionizada, 1 M de uréia em água deionizada e 0,5.M de NaCl em água deionizada. Uréia é um "quebrador" da estrutura da água. Seria de esperar que interações hidrofóbicas rompessem em soluções aquosas às quais foi adicionada uréia. Por outro lado, a adição de NaCl, comprovadamente melhora as interações intermoleculares desses copolímeros. A redução de arrasto diminui fortemente pela adição de uréia e melhora com a adição de NaCl.

O efeito de macromoléculas dissolvidas sobre a estrutura da água está bem documentada, tanto em termos da água "ligada" à cadeia de polímeros, quanto em estudos sobre a conformação do polímero e propriedades de escoamento.

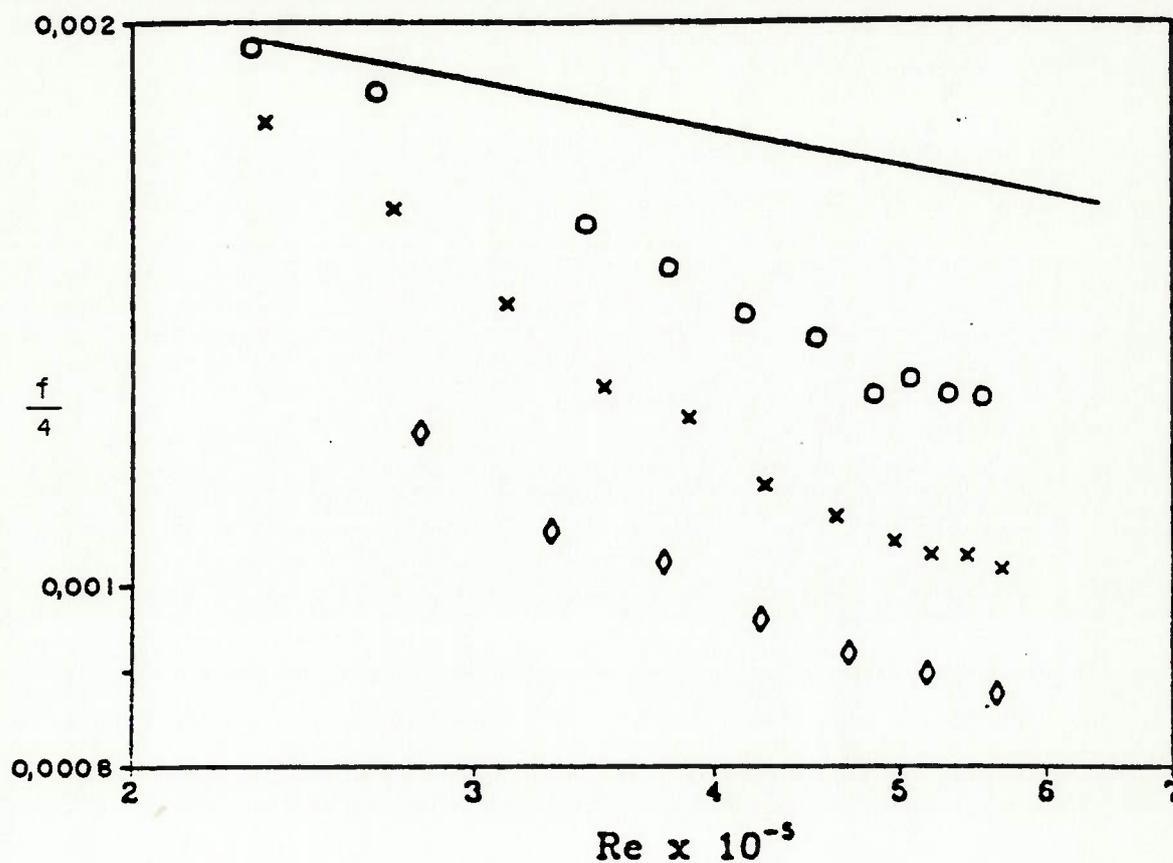


Figura 3 - Gráfico de f e Re . Influência da estrutura molecular da água no fenômeno de redução do arrasto: ensaio de copolímero acrilamida modificado com vários solventes (extraído de MORGAN, 1990)

Legenda: _____ solvente água

o polímero em 1 M de uréia

x polímero em água deionizada

v polímero em 0,5 M de NaCl

2.2.2 Biopolímeros

Os biopolímeros constituem uma gama de polímeros encontrados na natureza os quais, na forma natural ou modificados reduzem eficazmente o arrasto.

Nos últimos 30 anos, vários estudos demonstraram que o muco secretado por certos tipos de peixes é redutor do arrasto (HOYT, 1975). Foi sugerido que os peixes predatórios que nadam sozinhos e não em cardumes usam seu revestimento redutor do arrasto para aceleração, quando caçam ou fogem. Por outro lado, peixes em cardumes podem se aproveitar da alta concentração local de muco redutor do arrasto levando a um dispêndio menor de energia, para que o cardume inteiro possa nadar. Acredita-se que os polissacarídeos contidos em muco de peixe são os responsáveis pelo efeito redutor do arrasto. Vários outros tipos de polissacarídeos também reduzem o arrasto, inclusive os produzidos por plantas, bactérias algas marinhas e de água doce e animais. O Prof. A.W.HOYT fez uma análise detalhada dos polissacarídeos redutores de arrasto.

Um dos biopolímeros mais usados comercialmente é a goma da *Cyanopsis tetragonaloba* (goma guar - GG), um polissacarídeo vegetal de estrutura semirígida. Tem sido usado há tempo nos campos de petróleo e os trabalhadores na indústria petrolífera foram os primeiros a descobrir seu efeito redutor do arrasto. A maior restrição do guar e outros

polímeros naturais em utilizações na redução do arrasto é sua suscetibilidade à biodegradação, Foi mostrado que se pode aumentar a resistência ao cisalhamento e à biodegradação, enxertando acrilamida às moléculas de guar. Foi encontrada uma redução do arrasto (RA) em misturas de guar com fibras ou outros tipos de polímeros.

Outros polissacarídeos vegetais que reduzem o arrasto são: gomas de alfarroba e alcantira. Essas gomas são menos eficientes que a guar em soluções baixas. Celuloses modificadas como a carboximetil celulose (CMC) e hidroxietil celulose (HEC) foram usadas comercialmente e em estudos laboratoriais. O CMC foi o primeiro biopolímero solúvel em água cujas propriedades redutoras do arrasto foram relatadas na literatura (HOYT, 1975).

Outro biopolímero de amplo uso comercial para a redução do arrasto é a goma xanthan (XG) subproduto da destilação do açúcar. O biopolímero XG é um polissacarídeo multicelular produzido nestas instalações, pela ação das bactérias Xanthomonas. A molécula de xanthan consiste de uma rígida estrutura celulósica com grupos laterais, flexíveis e com carga elétrica. A conformação molecular depende da salinidade do solvente. O XG tem um comportamento reológico variável com a intensidade iônica do solvente, velocidade de escoamento e concentração de polímeros com correspondente variação da RA. O comportamento RA de XG, como função dessas soluções variáveis, foi detalhadamente estudado pelos Srs.

W.S.ROCHEFORT e S.MIDDLEMAN (1985 e 1986). O Sr. KENNIS provou que XG tem maior estabilidade de cisalhamento, do que a maioria das outras moléculas, amplamente usadas na redução do arrasto. O Sr. DESHMUKH e colaboradores provaram uma maior RA, estabilidade de cisalhamento e resistência à biodegradação para copolímeros enxertados XG-g-PAM, ou seja, o polímero, goma xanthan enxertado com poli(acrilamida). Outras bactérias tais como as Pseudomonas, Neisseria e Arthrobacter, que também produzem polissacarídeos, são bons redutores do arrasto. O Prof. A.W.HOYT (1975) relatou que quase todas as algas multicelulares e muitas das algas marinhas unicelulares excretam polissacarídeos redutores do arrasto. Extratos de algas tem boas propriedades RA além de múltiplas aplicações comerciais. Certas algas de água doce, também produzem polissacarídeos redutores do arrasto. Resultados anômalos em estudos de testes de navios, foram atribuídos à presença de polissacarídeos de algas e bactérias em tanques de rebocamento e outras instalações para estudos hidrodinâmicos.

O Prof. A.W.HOYT sugeriu que o parâmetro regulando a RA por polissacarídeos, não resulta da composição química, nem da rigidez da cadeia molecular, mas sim da linearidade dos polímeros. Ele prognosticou que, para ser um bom redutor da resistência ao arrasto, o polímero deve ter alto peso molecular e, em geral, ter estrutura linear. O raciocínio é

usado para explicar a ausência de RA para polissacarídeos muito ramificados como a goma arábica ou o dextran.

Experiências de RA em escala laboratorial, também foram feitas com proteínas e DNA. O desempenho RA dessas substâncias depende da conformação do polímero (i.e. estado natural ou desnaturado) portanto, é muito afetada por processos de purificação, pH do solvente e sua intensidade iônica, concentração de polímero e velocidade de escoamento.

2.2.3 Polímeros Sintéticos

Vários polímeros sintéticos de alto peso molecular e solúveis em água, tem RA eficaz em concentrações , em geral, muito mais baixas do que as necessárias para os biopolímeros, (SELLIN e colaboradores, 1982). Desses, o poli(óxido de etileno) (PEO) é o mais usado em laboratório e comercialmente. PEO é uma molécula linear flexível encontrada no comércio com uma série de pesos moleculares. Desde que os Prof. A.G.FABULA e J.W.HOYT (1963) constataram suas extraordinárias propriedades na RA, PEO tornou-se um padrão para estudos de redução de resistência ao arrasto.

O PEO foi testado e usado em múltiplos usos comerciais incluindo sistemas de esgoto, extinção de incêndios e propulsão marítima. O "Polyox" da Union Carbide, em valores comerciais de PEO, é muito empregado em sistemas de RA. O uso

de PEO para repassagens múltiplas é restrito devido à sua extrema sensibilidade à degradação por cisalhamento.

Apesar de PEO ter sido estudado em soluções aquosas, uma RA eficaz foi comprovada, também em outros solventes. Uma RA similar àquela conseguida com a água foi observada em solventes como a água do mar, plasma, benzeno, dioxano, tetracloro de carbono, nitrometano, clorofórmio, dicloreto de metileno e anisole (HOYT, 1975). Sistemas mistos de PEO, como copolímeros enxertados PEO, misturas polímero/sabão e polímero/corante, exibiram graus diferentes de RA.

O poliacrilamida (PAM) é outro polímero sintético, solúvel em água, amplamente usado para fins comerciais. É uma molécula linear, flexível, que polimeriza facilmente até pesos moleculares super altos. O PAM difere de PEO por ter uma cadeia lateral e é menos suscetível à degradação por cisalhamento (HOYT, 1986). O polímero relacionado, poli(ácido acrílico) (PAA) pode ser formado por hidrólise de PAM ou sintetizado a partir do monômero de ácido acrílico. Copolímeros de PAM com PAA podem ser formados por hidrólise parcial de PAM (HPAM) ou copolimerização [poli(acrilamida-co acrilato de sódio)] (PAM -co-NaA). Dependendo das condições de polimerização, das técnicas de preparação da solução, pH do solvente e intensidade iônica, qualquer uma dessas espécies pode ser encontrada em uma solução PAM. O pH da solução determina se o polímero existirá como uma espécie sem carga elétrica ou na forma de um poli-eletrólito (MOLYNEUX,

1983). Em qualquer solução redutora do arrasto são necessários procedimentos experimentais cuidadosos, para verificar a forma verdadeira de PAM.

Por causa de suas diferentes propriedades em solução, PAM e PAA têm sido usados em estudos sobre os diferentes aspectos do fenômeno de RA. A RA de HPAM, em varias condições de solvente foi medida para examinar os efeitos de alongamento e flexibilidade da cadeia molecular, volume hidrodinâmico do polímero, peso molecular e sua distribuição (KULICKE, 1984 e MATSUKHOV, 1985). PAM foi enxertado em biopolímeros para dar maior resistência à degradação biológica e por cisalhamento (McCORMICK e colaboradores, 1987). Misturas de PAM com fibras e outros tipos de polímeros evidenciaram uma melhor RA e mais estabilidade ao cisalhamento.

O Prof. C.L.McCORMICK e colaboradores estudaram a RA de uma série de copolímeros PAM. Vários dos copolímeros sintetizados mostraram uma maior eficácia na redução do arrasto do que PAM.

O PAM tem sido usado na maioria dos usos comerciais de RA por polímeros solúveis em água. Varias qualidades de PAM e HPAM redutores do arrasto são encontradas no comercio, inclusive os polímeros "Separan" da Dow Química S.A.

Vários outros polímeros sintéticos solúveis em água foram testados, em laboratório, para a RA. Todavia, a maioria dos estudos e testes focalizam PEO e PAM por sua

disponibilidade, seu custo relativamente baixo e a farta bibliografia descrevendo seu comportamento em solução. Polímeros do "tipo acrílico", semelhantes a PAM como o poli(acido metacrílico) (PMAA), também reduzem o arrasto (MATSUKHOV, 1985). Outros polímeros sintéticos solúveis em água, tiveram suas propriedades redutoras do arrasto examinadas (BLOCK, 1975).

O fato de polímeros de composições químicas muito diferentes reduzirem o arrasto em solventes aquosos e em hidrocarbonetos levou alguns pesquisadores a sugerir que, para o fenômeno de RA, a estrutura molecular não é muito importante (HOYT, 1972). Todavia, existem muitos estudos mostrando que mudanças dos parâmetros moleculares têm efeitos importantes sobre o desempenho da RA, como peso molecular, agregação ou flexibilidade da cadeia.

2.3 O Comportamento Hidrodinâmico da Solução Polimérica

Do ponto de vista reológico, os materiais fluídos comportam-se como mostrado na Figura 4, em que τ é a tensão de cisalhamento e du/dy é a taxa de deslizamento (ASSY, 1989).

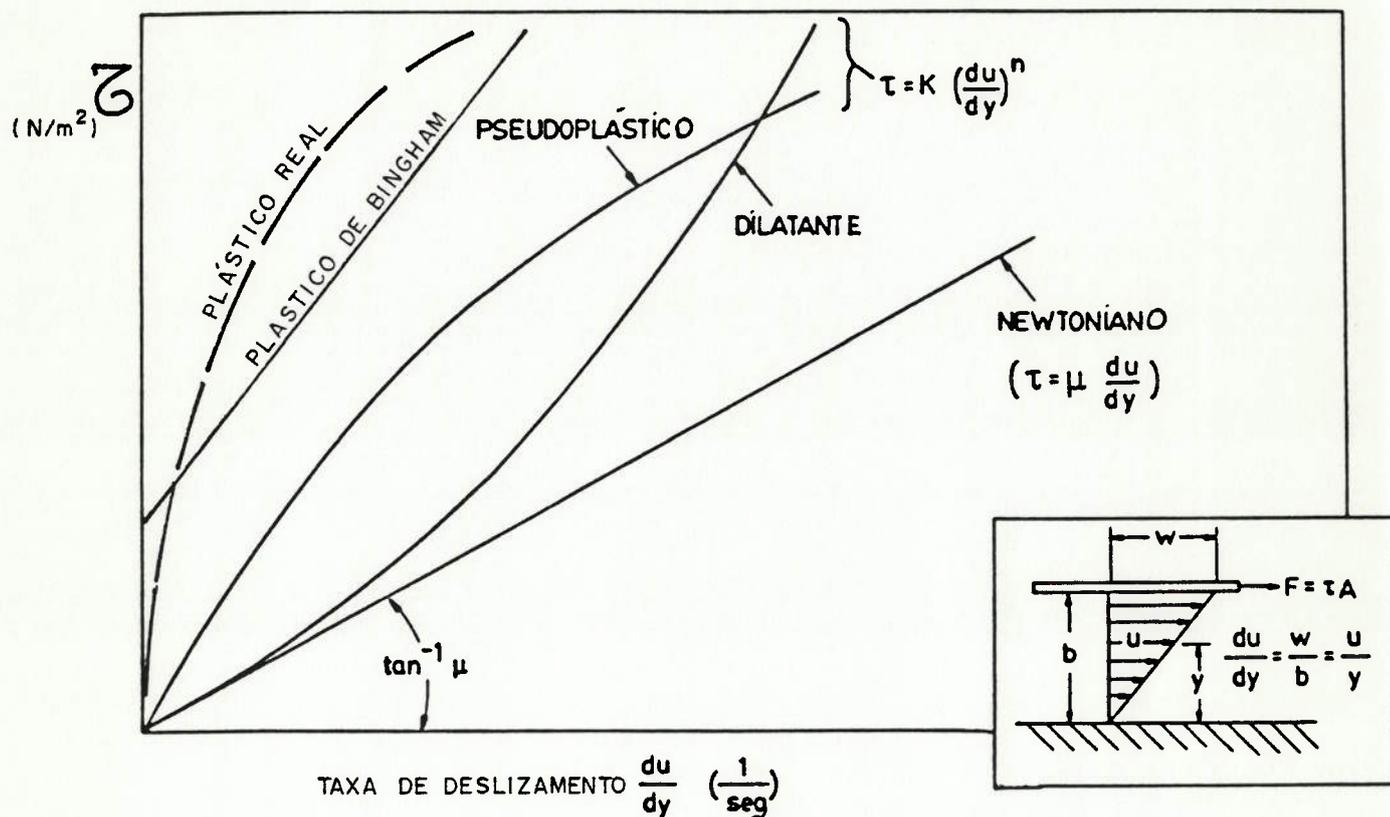


Figura 4 - Gráfico representativo da tensão de cisalhamento na parede (τ) e taxa de deslizamento (du/dy) entre duas placas para fluidos newtonianos, fluidos não newtonianos e plásticos (extraído de T.M.ASSY, 1989)

Os gases e líquidos de baixo peso molecular são quase sempre newtonianos. Entre os fluidos não newtonianos citam-se soluções de vários polímeros, tintas, emulsões, etc.

Os primeiros esforços para entendimento da capacidade de redução do arrasto de certas soluções de polímeros basearam-

se no estudo da viscosidade variável com a taxa de deslizamento ou seja, fluídos não newtonianos. Os diagramas de grandezas reológicas dos fluídos, chamados reogramas, são frequentemente apresentados em escala logarítmica associando a tensão de cisalhamento na parede e a taxa de deslizamento.

Os reogramas são apresentados pelos Srs. R.H.SELLIN, I.W.HOYT e O.SCRIVENER (1982) e transcritos na Figura 5 e Figura 6, respectivamente, para solução diluída de poli(óxido de etileno), (PEO) e para soluções de concentrações crescentes de goma guar (GG). Destas figuras pode-se concluir que, para soluções de polímeros com concentrações de centenas de partes por milhão ou até menos, constata-se comportamento como fluídos newtonianos para valores baixos da taxa de deslizamento. Altas concentrações causam tanto efeitos característicos de fluídos pseudo-plásticos como de fluídos dilatantes, ou seja, fluídos não newtonianos. Contudo, soluções de polímeros em forma concentrada mostram, frequentemente, evidência de escoamentos viscoelásticos. Nos escoamentos viscoelásticos, ocorrem tensões na direção perpendicular ao plano da tensão de

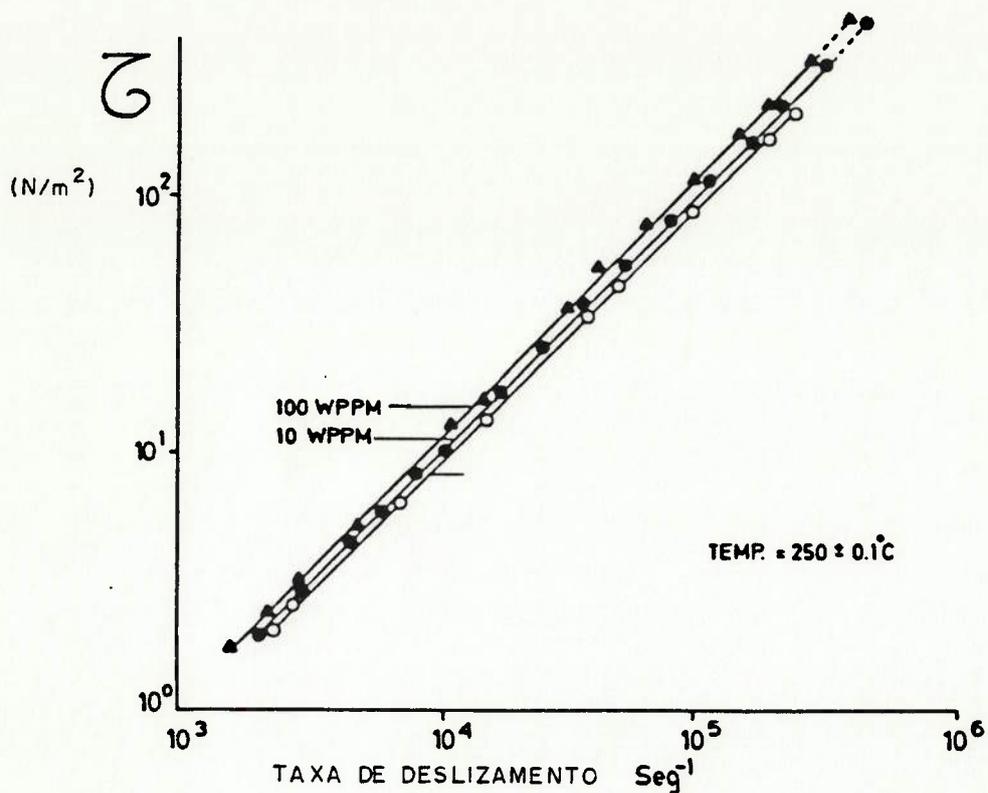


Figura 5 - Reograma da água e de solução água-poli(óxido de etileno) a duas concentrações (extraído de SELLIN, 1982)

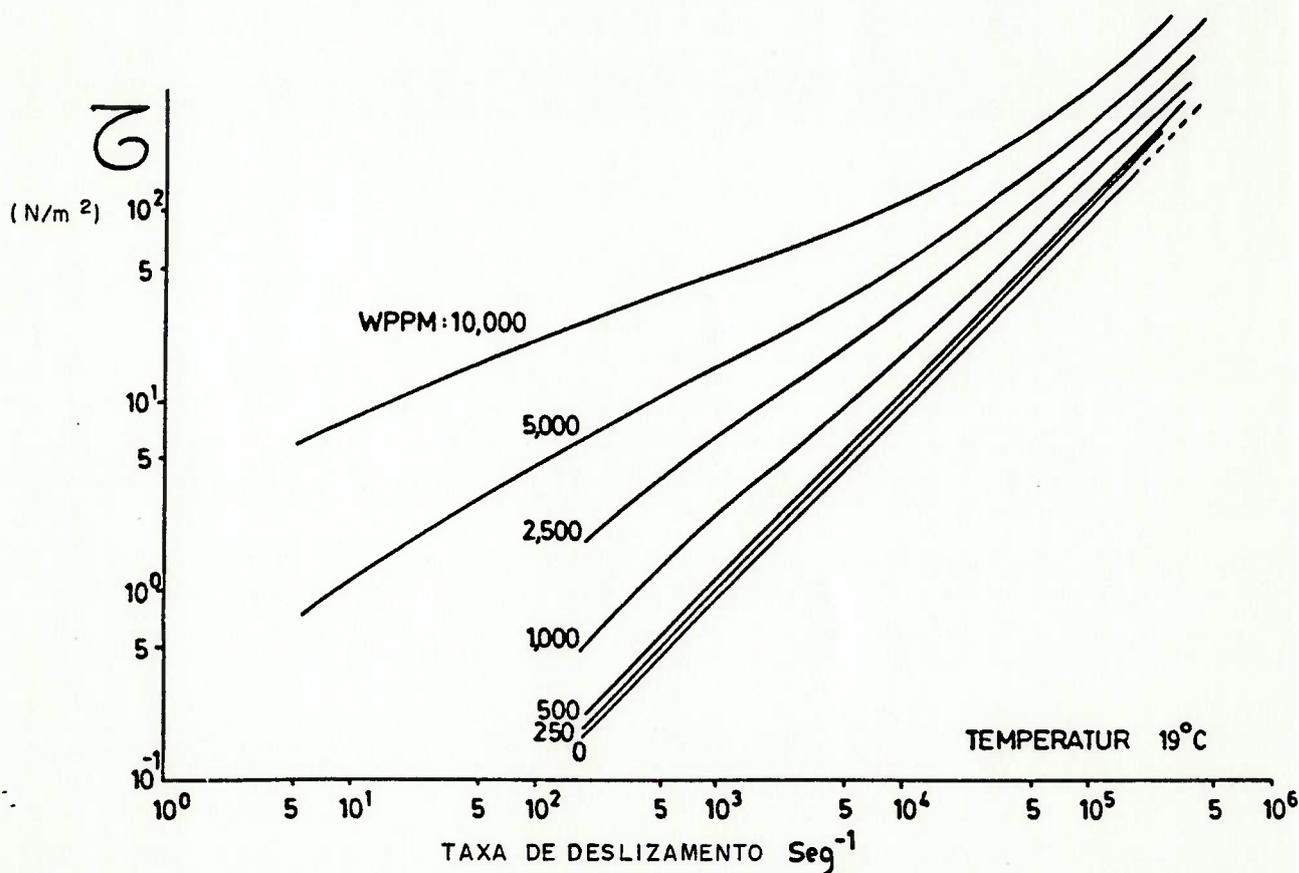


Figura 6 - Reograma da água e solução água-goma "guar" para seis concentrações (extraído de SELLIN, 1982)

cisalhamento τ , sendo que a magnitude das tensões normais τ_N varia com a taxa de deslizamento.

Não obstante este conjunto de afirmações, constata-se experimentalmente que o efeito de redução de arrasto manifesta-se quando se verificam as seguintes condições:

- a) utilização de polímeros com peso molecular de 500.000 ou maior;
- b) a cadeia da molécula do polímero é basicamente linear, e
- c) o polímero é solúvel

Verificando-se estas condições, reduções de arrasto da ordem de 70% são realmente atingidos em escoamento de soluções poliméricas. Reconhece-se por outro lado que muitos polímeros em solução já preenchem estas condições, revestindo-se de grande interesse as enormes possibilidades abertas pela Engenharia Química, de síntese de novos compostos exclusivamente para este fim.

3. REDUÇÃO DE ARRASTO EM CONDUTOS

3.1 Introdução

Os escoamentos em condutos cilíndricos de diâmetro e rugosidade relativa dados, são caracterizados pela velocidade média e perda de carga. Para quantificação desses elementos o coeficiente de perda de carga distribuída f é dado em função do número de Reynolds R seguindo a expressão analítica de Colebrook ou sob forma gráfica (diagrama de Moody) ou seja f em ordenadas e R em abscissas.

A Figura 7 mostra o diagrama de Moody para uma situação hipotética de redução de arrasto em condutos.

Nenhuma diferença da solução polimérica é observada relativamente ao comportamento do solvente tanto na região de escoamento laminar como na transição para o regime turbulento. Quando o escoamento se torna turbulento, o início tem lugar em um dado ponto A ou para um número de Reynolds R_A . A partir daí, o coeficiente de perda de carga distribuída para a solução polimérica, decresce segundo a curva AB, à medida que o número de Reynolds aumenta, afastando-se o seu valor, consideravelmente, da curva correspondente à do hidraulicamente liso. No limite, os valores de f para a solução polimérica podem atingir uma linha inferior ou assíntota em B, a qual é seguida para valores crescentes de Re . A curva AB é conhecida como "zona polimérica", lugar de

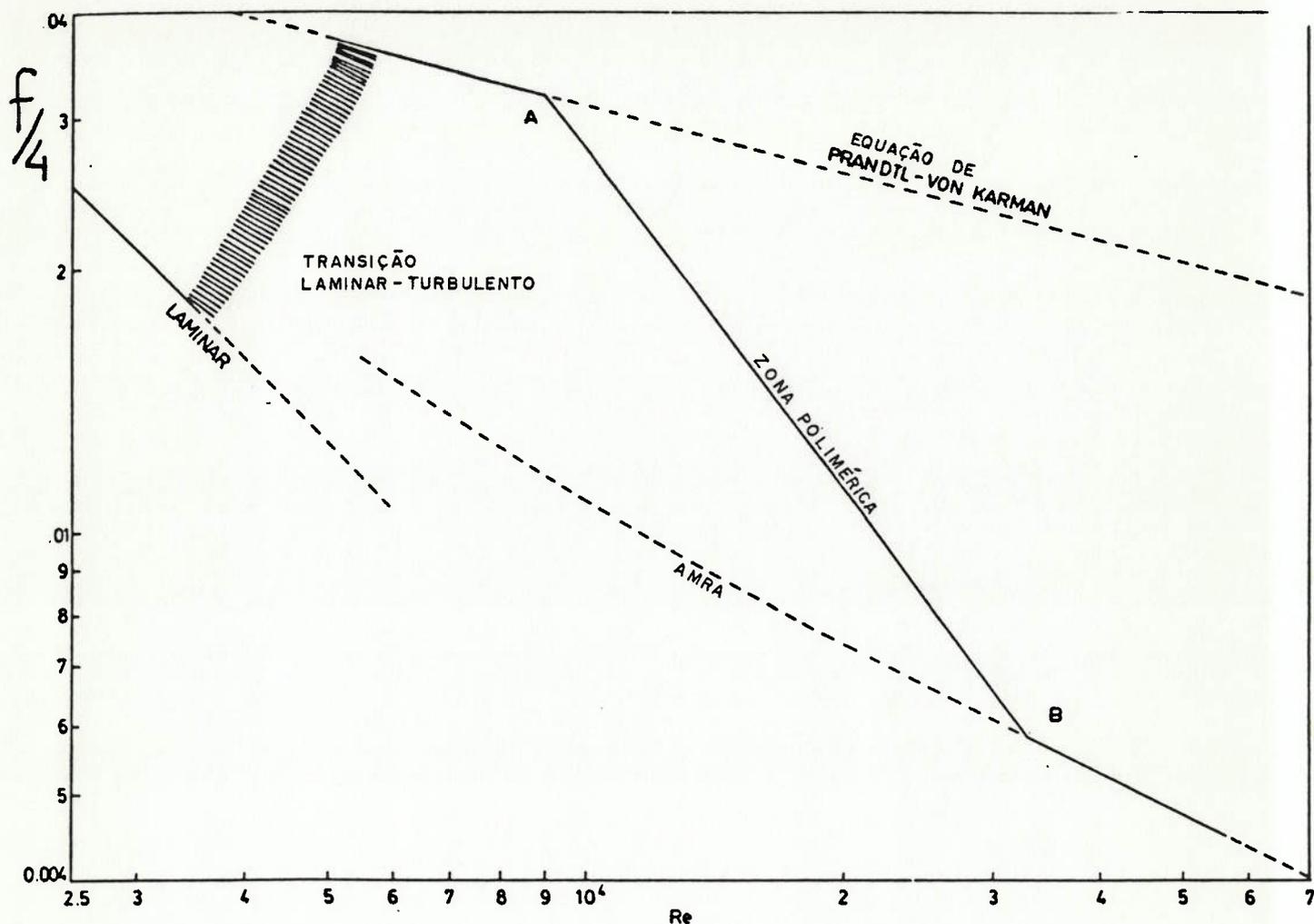


Figura 7 - Diagrama de Moody ($f \times Re$) para uma situação hipotética de redução de arrasto em condutos (extraído de SELLIN, 1982)

redução de arrasto. A partir de B, tem-se a assíntota de máxima redução de arraste (AMRA), estabelecida por P.S.VIRK para intervalo de Re entre 3.000 a 140.000.

A Figura 7 mostra a situação de um conduto que se comporta como hidráulicamente liso. Se o escoamento for hidráulicamente rugoso, os pontos A estarão situados sobre

curvas acima da curva de escoamento hidráulicamente liso, dependendo da rugosidade relativa e do número de Reynolds, começando então deste ponto, a curva de redução do arrasto.

Como já mencionado, a redução do arrasto é produzida por polímeros solúveis, de alto peso molecular e certas características como distribuição dos pesos moleculares, formato da cadeia molecular, degradação por utilização, envelhecimento ou armazenamento, etc. Além disso, são importantes as variáveis do conduto como rugosidade, diâmetro e o número de Reynolds do escoamento. Por isso a previsão do comportamento da solução polimérica procura correlacionar estas variáveis com a eficiência de Redução de Arrasto (ERA) assim definida:

$$ERA = \left(\frac{f_s - f_p}{f_s} \right) \times 100$$

onde f_s e f_p são respectivamente, os coeficientes de perda de carga distribuída sem e com polímero.

3.2 Aspectos fenomenológicos da redução de resistência ao arrasto

Foram propostas várias teorias que tentam explicar o mecanismo da redução do arrasto por polímeros, porém, até o momento, não há nenhuma suficientemente abrangente e universalmente aceita

Os primeiros estudos indicavam que o "início" da redução do arrasto (o ponto em que a solução de polímeros mostra pela primeira vez um atrito menor do que o do solvente) variava para amostras diferentes de polímeros ou para geometrias usadas nos testes (Fig 8). Em geral o início ocorre em um número de Reynolds mais baixo para polímeros de peso molecular mais alto ou em condutos de menor diâmetro. Em alguns casos, o início da redução de resistência ao arrasto se dá ao mesmo tempo do que a transição de escoamento laminar para turbulento.

Há também evidência de diferentes tipos de início em soluções de polímeros em espirais aleatórias em relação aos em bastonetes rígidos (fibras). P.S.VIRK (1975) define um "retro-início" para polímeros de estruturas rígidas. As curvas da solução de polímeros desviam da curva do solvente na transição de escoamento laminar para turbulento, voltam para a linha do solvente no ponto de retro-início e depois decaem em índices mais altos de escoamento (Fig. 9). Nos primeiros experimentos também foi relatado o fenômeno da redução máxima do arrasto (VIRK, 1975). Para um dado sistema polímero/solvente, uma combinação específica de condições de escoamento, peso molecular do polímero e concentração de polímeros produz um total de redução máxima do arrasto que não será superado com a adição de mais polímeros (Fig. 10). Todavia, não há um valor universalmente aceito para a assíntota da redução máxima do arrasto.

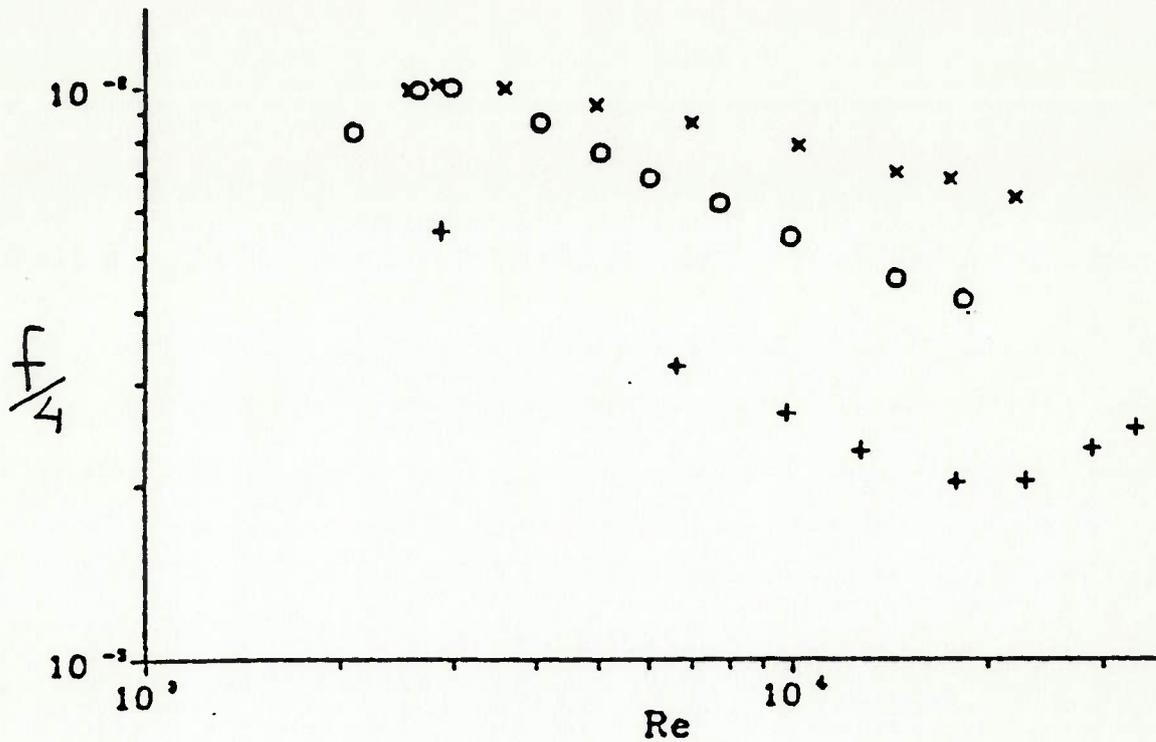


Figura 8 - Diagrama $f \times Re$ em condutos para soluções 10 ppm de água-poliacrilamida para diferentes pesos moleculares (extraído de MOLYNEUX, 1983)

Legenda: x solvente água
 o PAM com $PM = 6 \times 10^6$
 + PAM com $PM = 24 \times 10^6$

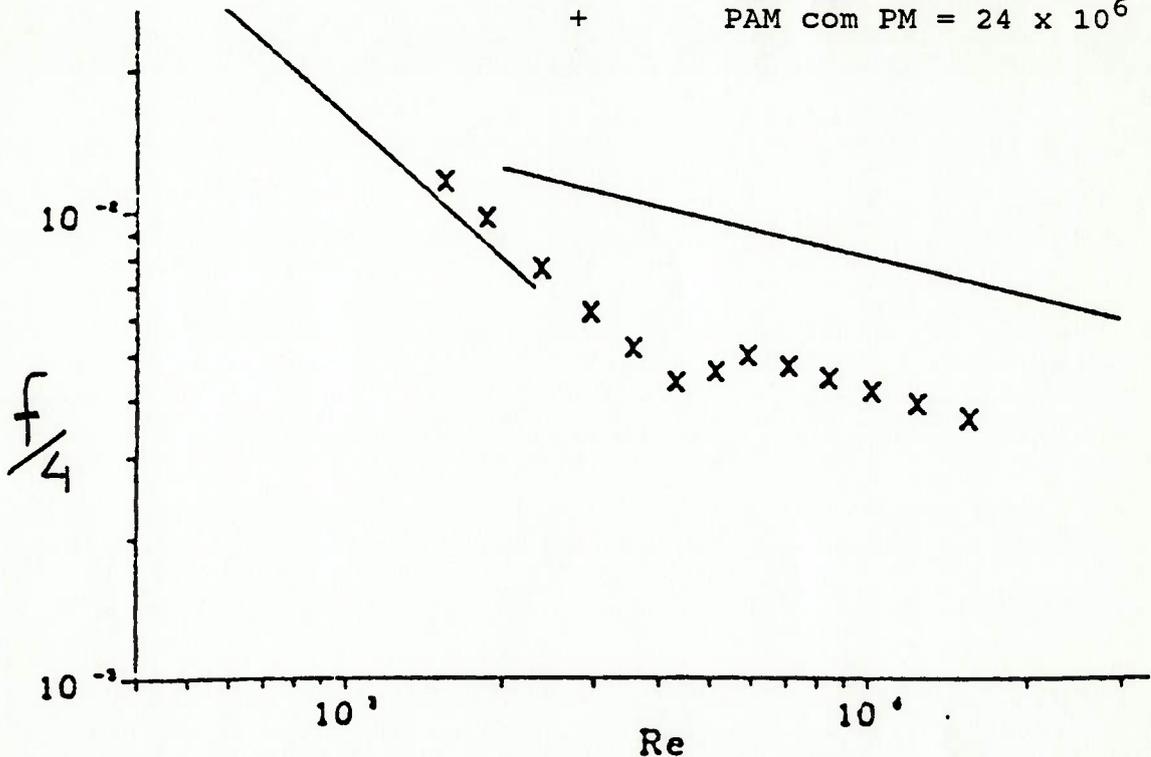


Figura 9 - Diagrama $f \times Re$ com início antecipado da redução de arrasto para polímeros de estruturas moleculares rígidas (extraído de VIRK, 1975)

Legenda: x polímero com estrutura rígida

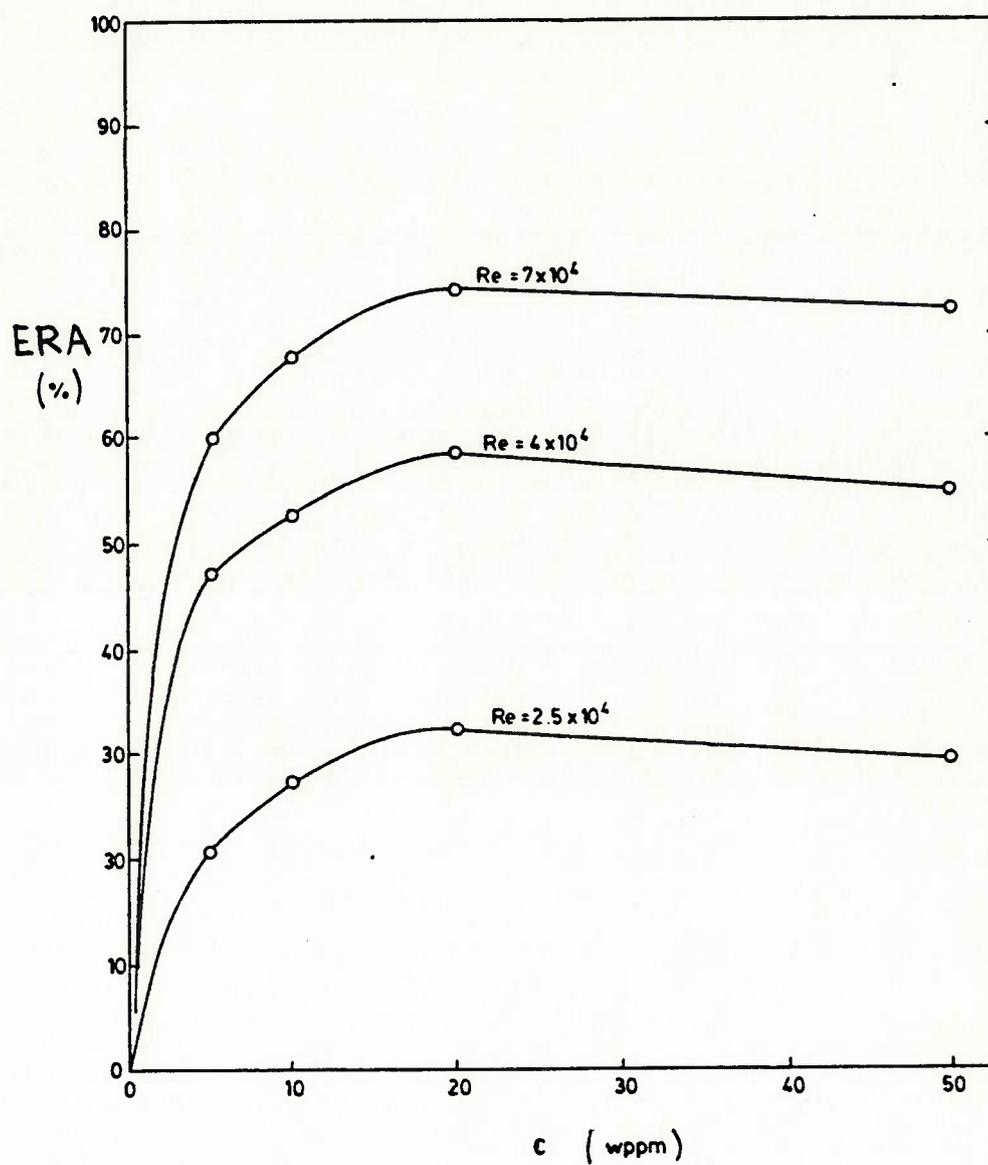


Figura 10 - Gráfico da Eficiência de redução do arrasto (ERA) em relação à concentração da solução polimérica, para três diferentes números de Reynolds (extraído de SELLIN, 1982)

Há registro de que o máximo pode ser superado em sistemas conglomerados ou pela suspensão de fibras em soluções diluídas de polímeros.

Os efeitos do peso molecular (PM) dos polímeros e da degradação por cisalhamento são aspectos correlatos. A redução de resistência ao arrasto (RA) ocorre somente após ser atingido algum peso molecular mínimo, característico do polímero e depois aumenta com o aumento do peso molecular até um máximo onde o aumento de PM não mais afeta RA. A degradação por cisalhamento dos polímeros, durante experiências de redução do arrasto, foi amplamente observada. O desempenho RA é reduzido à medida que diminui o PM dos polímeros. Foram empreendidos vários estudos sobre os dois efeitos.

Os estudos de escoamento turbulento usando anemometria doppler a laser (LDA) e técnicas de visualização do escoamento comprovaram que a presença de aditivos redutores do arrasto modifica tanto o movimento turbulento em pequena escala quanto o em grande escala. O efeito das moléculas de polímeros sobre o perfil de velocidades foi descrito na fase incipiente do estudo desse fenômeno. Em um escoamento turbulento em condutos, existem três camadas: uma sub-camada laminar viscosa junto à parede (filme laminar), uma zona de transição "buffer-layer" (zona tampão ou sub-camada elástica) e uma faixa turbulenta no centro conduto (núcleo turbulento). A adição de polímeros aumenta a espessura da zona tampão,

entre as outras duas camadas. Muitos pesquisadores sugeriram que esse achado indica que as moléculas de polímero devem interagir com pequenos vórtices, à medida que se formam ou crescem, na região próxima à parede. A Figura 11, representa a distribuição de velocidades e distâncias na camada limite, sob forma adimensional, representando por ΔB a parcela de alteração da velocidade decorrente da adição de polímero. A velocidade U^+ é adimensionalizada em relação à velocidade de atrito μ^* calculada pela relação $(\tau/\rho)^{1/2}$, com τ sendo tensão de cisalhamento junto à parede e ρ a massa específica da solução. A distância à parede y^+ por sua vez, é adimensionalizada usando o número de Reynolds de atrito, ou seja, $y.\mu^*/\nu$ sendo ν a viscosidade cinemática da solução.

Os aditivos redutores do arrasto também modificam estruturas turbulentas de maior escala, tais como veios (streaks) e rupturas (bursts) (BEWERS DORFF, 1984). O uso de corantes permite um acompanhamento visual dos veios das faixas de pouca velocidade no filme laminar. Os estudos mostraram que polímeros aumentam o espaçamento entre veios. As rupturas turbulentas se formam através de um processo em três etapas, que consiste de elevação, oscilação e quebra de veios de pouca velocidade. A adição de moléculas de polímeros reduz a frequência das rupturas.

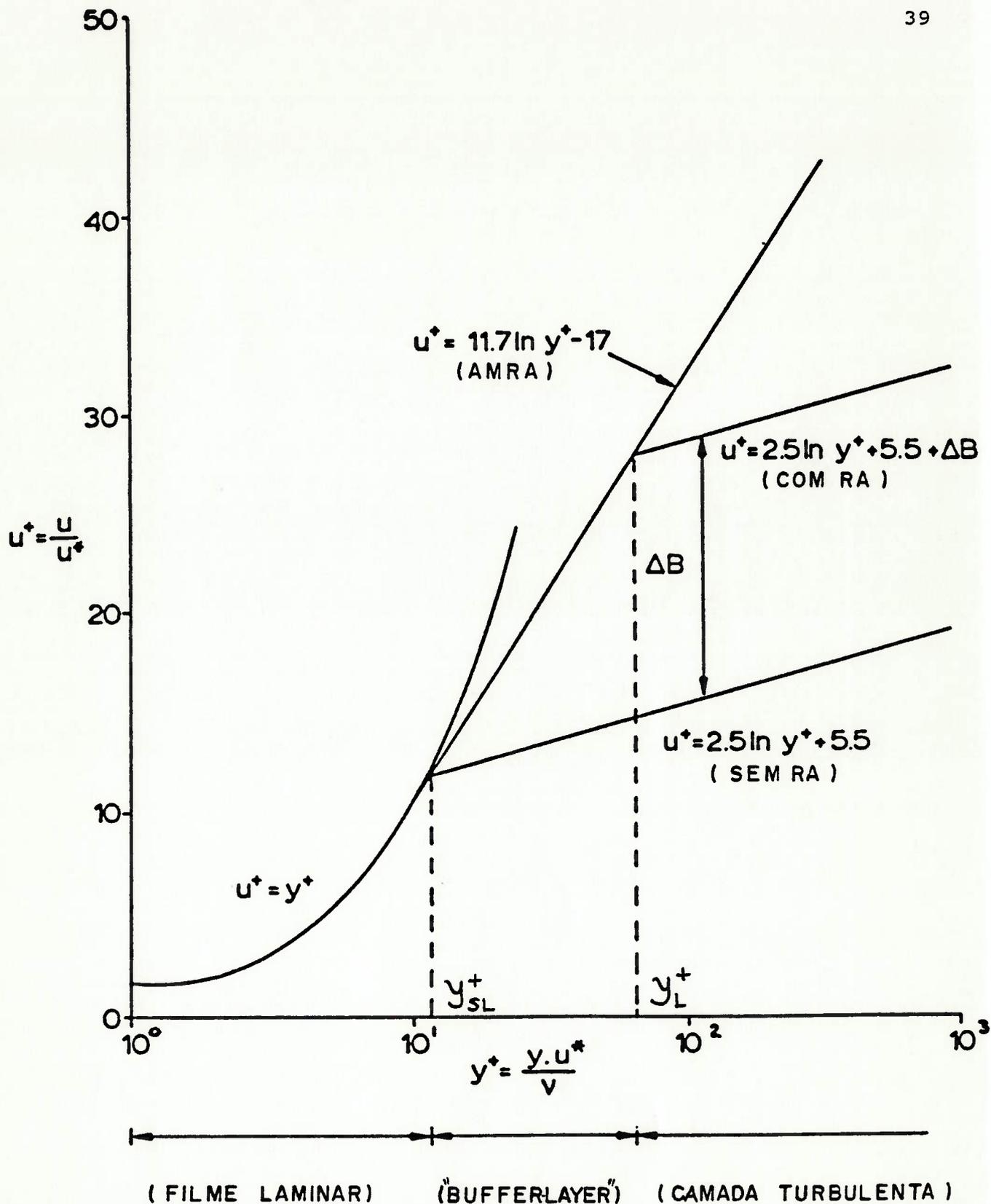


Figura 11 - Diagrama adimensional de distribuição de velocidade a partir da parede de conduto, com e sem redução de arrasto (extraído de SELLIN, 1982)

Os aditivos de polímeros não reduzem apenas as estruturas de turbulência existentes, como também produzem estruturas que não são encontradas no solvente puro. Essas incluem flutuações de velocidades associadas ao deslocamento dos polímeros e grandes estruturas, ordenadas, de turbulência (KULICKE e colaboradores, 1984). Foi aventado que os deslocamentos da estrutura de turbulência em grande escala podem fazer parte do mecanismo de redução de resistência ao arrasto (MATJUKHOV e colaboradores, 1985).

As moléculas de polímeros redutores do arrasto afetam também, as propriedades do escoamento relacionadas a cavitação, escoamento extenso ("extensional") e transferência de massa e calor (HOYT, 1986). Cavitação é a formação de bolhas de vapor no escoamento quando, à temperatura em que o líquido se encontra, a pressão do líquido cai abaixo da pressão vapor. As moléculas de polímero retardam a formação de bolhas e reduzem o fenômeno da cavitação. Nos escoamentos tais como os escoamentos em meios porosos, a resistência ao escoamento é muito grande para uma dada vazão. Nesta região a viscosidade do polímero aumenta sensivelmente afetando a posição do início e o mecanismo da redução do arrasto. Nos escoamentos turbulentos que não propriamente extensos, existem regiões em que as moléculas, sendo grandemente aumentadas, afetam igualmente, o início e o mecanismo da redução do arrasto.

Em estudos onde as soluções de polímeros foram injetadas em várias porções de um escoamento turbulento em condutos, MCCOMB e RABIE (1982), acharam que a redução do arrasto é inversamente proporcional à distância de aplicação da solução de polímeros da parede do conduto.

Estes pesquisadores notaram ainda o seguinte: profunda mudança na estrutura do escoamento quando as soluções poliméricas são injetadas nas proximidades das paredes, mas nenhum efeito foi notado sobre os diagramas quando a solução polimérica foi injetada no centro do conduto.

Entretanto, outros pesquisadores (BEWERSDORFF, 1984 e BERMAN, 1984) verificaram redução desigual de arrasto para soluções poliméricas injetadas ao longo do eixo do conduto. Estas reduções de arrasto eram determinadas enquanto os filetes da solução polimérica permaneciam intactos ao longo do eixo dos condutos, que interferiam aparentemente apenas com os turbilhões de grande escala. Assim, diferentes mecanismos podem estar envolvidos quando ocorrem reduções uniformes ou desiguais de arrasto.

3.2.1 Os primeiros modelos de previsão da redução de arrasto

A partir do descobrimento de fenômenos de redução de arrasto, até o final dos anos 70, os modelos de previsão foram propostos por pesquisadores especializados em Ecologia. A idéia de um "efeito-parede", tal como um escorregamento

junto à parede; uma camada redutora do cisalhamento próxima à parede, ou uma camada de macromoléculas absorvidas na parede, não tiveram comprovação experimental. Outras teorias deste mesmo período analisaram a visco-elasticidade das soluções de polímeros e sugeriram que viscosidade não-isotrópicas é responsável pelo efeito. Nesta hipótese, a viscosidade seria baixa, no sentido do escoamento mas, suficientemente alta em qualquer outra direção, para atenuar flutuações turbulentas. Todavia, não existem comprovações de uma correlação entre essas tensões "normais" e a redução de resistência ao arrasto.

Alguns autores sugeriram que sistemas de polímeros muito enovelados estivessem relacionados na redução de arrasto. Embora o aumento RA pelos agregados de moléculas tenha sido claramente demonstrado, existem vários sistemas nos quais soluções muito diluídas de macromoléculas isoladas reduzem o arrasto. Outros pesquisadores acharam que a resistência das moléculas de polímeros ao estiramento era responsável pela supressão da turbulência. O Sr. W.PFENNINGER (1967) postulou que as macromoléculas absorviam a energia cinética de vórtices turbulentos por estiramento e eventual quebra. Todavia, não há evidência clara de que a degradação molecular por cisalhamento esteja implicada no mecanismo da redução do arrasto, sendo em geral, considerada um indesejável efeito marginal do processo.

A partir da década de 70, apareceram várias teorias sugerindo que as moléculas de polímeros interferem com a produção, aumento ou transporte de perturbações turbulentas. Essas teorias explicam muitas das modificações observadas na estrutura de turbulência do escoamento para redução do arrasto. Decorrido este primeiro período é possível, atualmente, propor uma classificação dos modelos de previsão com base em comprimentos da molécula de polímero (escala de comprimento), em tempo de repouso (ou relaxação) do polímero (escala de tempo) e em alteração das perdas de carga do escoamento turbulento (modelo energia). Destaque-se que alguns modelos incorporam apenas alguns aspectos de cada um desses modelos podendo ser denominados de modelos mistos ou múltiplos.

3.2.2 Modelos de previsão baseados na escala de comprimento das moléculas de polímero

O professor P.S.Virk através de estudo publicado em 1975, define quatro regimes de escoamento para soluções poliméricas que reduzem o arrasto em condutos, conforme mostrado na Figura 12:

- o regime laminar (L) onde a solução polimérica acompanha a mesma curva do solvente:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{-1/2} = Re \left(\frac{f}{4}\right)^{1/2} / 16$$

onde f é o coeficiente perda de carga distribuída e Re é o número de Reynolds.

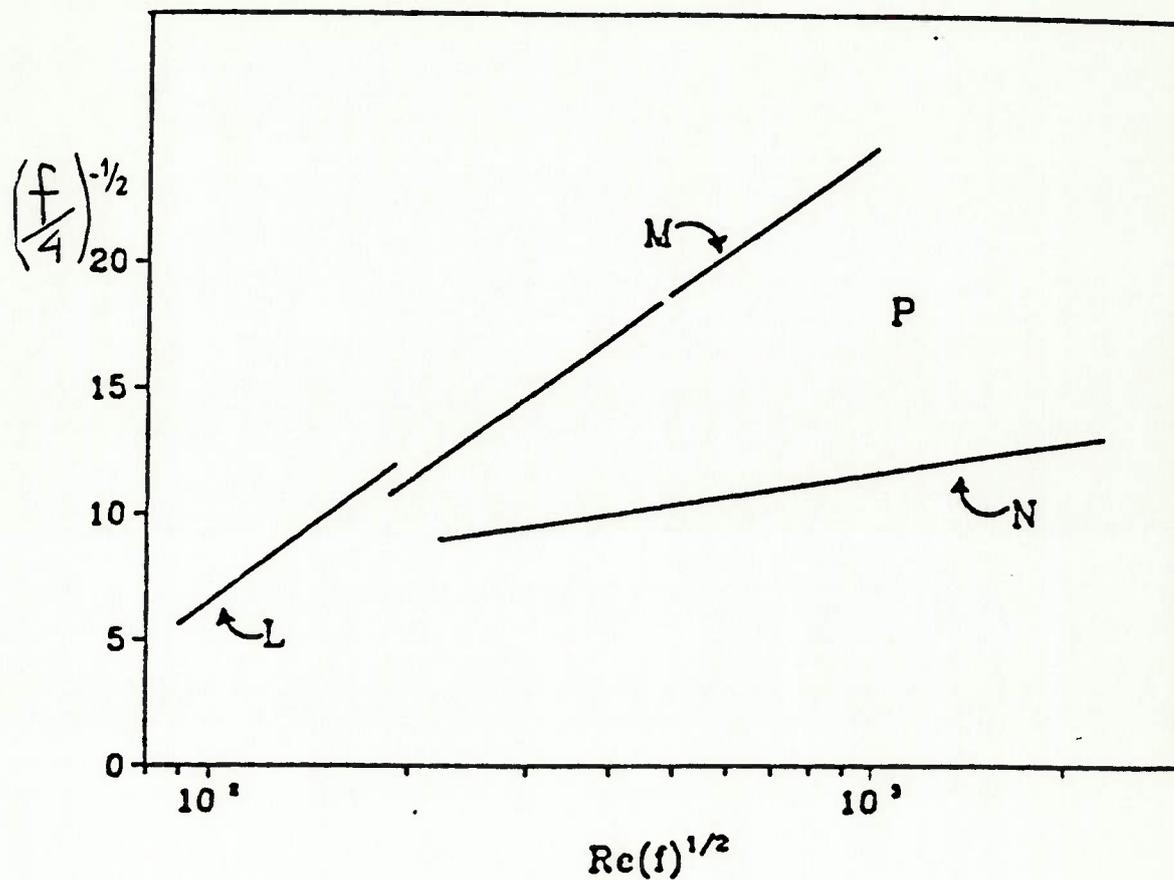


Figura 12 - Regimes de escoamentos em condutos com redução de arrasto (extraído de VIRK, 1975)

- o regime Newtoniano (N), turbulento, sem redução do arrasto, onde a solução de polimérica e o solvente seguem uma única relação:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{-1/2} = 4,0 \log_{10} Re(f)^{1/2} - 0,4$$

- o regime polimérico (P), onde a redução do arrasto depende das propriedades da solução polimérica tais como concentração, solvatação (associação molecular do soluto e solvente) e peso molecular, seguindo a seguinte relação:

$$\left(f/\frac{1}{4}\right)^{-1/2} = (4,0 + \delta) \log_{10} Re \left(f/\frac{1}{4}\right)^{1/2} - 0,4 - \delta \log_{10} \sqrt{2} d W^*$$

onde d é o diâmetro do conduto, δ denominado aumento da declividade, é uma medida da redução do arrasto e o número de ondas W^* é uma função da tensão de cisalhamento crítica da parede (τ^*) a partir da qual inicia-se a redução do arrasto.

- o regime de redução máxima do arrasto (M), onde alterações dos parâmetros da solução de polimérica não conseguem mais melhorar o desempenho da RA, valendo, a seguinte equação, conhecida como assíntota da máxima redução de arrasto (AMRA):

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

Virk sugere que o início da redução do arrasto está relacionado ao raio de giração da molécula do polímero R_g pela equação 5:

$$R_g^3 \cdot \tau^* = \Omega_t$$

onde Ω_t é a constante de início da redução do arrasto, específica a cada sistema polímero/solvente. Virk prevê que o início se dá quando a proporção entre o raio de giração do polímero e a escala de comprimento de turbulência T , atinge algum valor característico:

$$T = (2 R_g / \eta) (\zeta^* / \rho) \approx 0,015$$

onde ρ = densidade e η = viscosidade da solução polimérica.

Virk também relacionou o aumento da declividade (ou medida da redução do arrasto) ao comprimento do polímero. Ele define um aumento da declividade intrínseco Π e o relaciona ao número de ligações da estrutura molecular do polímero N , pelas equações 7 e 8..

$$\Pi = \delta / (C/M)^{1/2}$$

$$\Pi = k N^{3/2}$$

onde C é a concentração volumétrica da solução polimérica, M o peso molecular e k é uma constante de proporcionalidade que varia com o tipo de estrutura do polímero e do solvente. Moléculas em cadeias flexíveis como PEO ou PAM dão constantes de $70-100 \times 10^{-6}$, enquanto polímeros com estruturas limitadas como a hidroxietilcelulose ou a goma guar têm $k = 1500 \times 10^{-6}$.

Outros pesquisadores questionam essas previsões da escala de comprimento, em especial as sobre o início da RA. e a equação da assíntota da máxima RA.

O pesquisador B.HLAVACEK e colaboradores (1976) propuseram um modelo baseado no tamanho do campo hidrodinâmico de influência macromolecular. Interpretam a redução do arrasto em termos da modificação na estrutura do solvente, mais do que em termos da ação de moléculas individuais de polímeros, raciocinando que a concentração de polímeros é infinitamente pequena quando comparada ao solvente. Em escoamentos turbulentos, acredita-se que o solvente contenha microperturbações ou precursores de turbulência. Uma macromolécula suprime eficientemente a turbulência quando pode, ao mesmo tempo, permear dois ou mais micro-campos de ação, obstaculizando seu livre movimento e crescimento. A eficácia da RA deveria aumentar com o aumento do volume aparente do campo hidrodinâmico do polímero. A associação de esferas de ação de polímeros deveria fornecer um efeito ainda maior.

3.2.3 Modelos de previsão baseados na escala de tempo das moléculas de polímeros

As teorias da escala de tempo surgiram no final da década de 60 até meados da década seguinte, tendo sido enunciados principalmente por J.L.LUMLEY e N.S.BERMAN (1976).

Elas estabelecem que o início da RA deveria ocorrer quando a relação do tempo de relaxação (ou de redução da tensão) do polímero para a escala de tempo do escoamento turbulento for igual a 1, ou seja:

$$\theta \cdot \tau^* = (M \eta_s [\eta]) / 2.367 RT = 1,0$$

onde θ é o tempo de relaxação do polímero, η_s a viscosidade do solvente, τ^* tensão de cisalhamento da parede no início da RA, $[\eta]$ a viscosidade intrínseca do polímero, M peso molecular do polímero, R a constante do gás e T temperatura.

O Sr. J.L.LUMLEY sugere um valor crítico de tensão de cisalhamento da parede no qual as macromoléculas expandem por causa da variação das tensões. Essa ação não se dá no filme laminar perto da parede, pois as cadeias moleculares dos polímeros não são tão deformadas e a viscosidade não aumenta, sensivelmente, acima daquela do solvente. Na região turbulenta, a expansão macromolecular provoca uma viscosidade muito maior, (viscosidade de alongamento) que neutraliza pequenos turbilhões dissipativos e reduz a quantidade de movimento da "buffer-layer" (camada de frenagem ou camada tampão). Com a supressão de turbilhões na "buffer-layer" resulta um espessamento desta camada e em redução do arrasto.

LUMLEY também propõe que os polímeros alteram com mais intensidade, as estruturas turbulentas de pequena escala, do que as de grande escala e afirma que a turbulência remanescente no regime de máxima redução do arrasto é,

essencialmente, constituída por macro-turbilhões. Sugere-se que a máxima RA ocorre quando a espessura da sub-camada se expandiu até o centro do tubo.

A teoria de LUMLEY explica uma série de aspectos da redução de resistência ao arrasto, inclusive o início, a correlação com peso molecular, mudanças no perfil de velocidade e redução máxima do arrasto. Todavia, não aborda outros aspectos como o efeito das interações polímero/solvente e a flexibilidade da estrutura molecular do polímero.

O Prof. N.S.BERMAN (1984), no trabalho apresentado no Simpósio de Estrutura da Turbulência e Redução de Arrasto em 1976, denominado "Escala de Tempo do escoamento e redução do arrasto", também relacionou os tempos de relaxação molecular e do escoamento turbulento, a partir da definição do parâmetro escala de tempo interno ("inner time scale") μ^2/ν , onde μ^* é a velocidade de atrito e ν a viscosidade cinemática da solução polimérica. BERMAN concluiu que o início da redução do arrasto depende somente deste parâmetro e que depois deste ponto, a RA relaciona-se com tempo de duração dos macrovórtices, desde que as moléculas de polímero permaneçam esticadas e não se degradem, rompendo a cadeia molecular. Na ausência de degradação, as condições de RA são mantidas inclusive para diâmetros crescentes dos condutos.

3.2.4 Modelos de previsão baseados na energia do escoamento turbulento

O professor M. WALSH foi o primeiro pesquisador a propor, em 1967, uma teoria para o mecanismo de RA, que levava em conta a energia armazenada em macromoléculas esticadas, que sofreram um processo de alongamento. Em sua tese de doutoramento (1967), propôs H que é o quociente entre a participação das moléculas de polímero no balanço energético do escoamento e a contribuição de difusão de energia do filme laminar para a "buffer-layer". A expressão deduzida por WALSH é a seguinte: que as moléculas de polímero interferem com vórtices de escala pequena, à medida que se formam na borda do filme laminar. A capacidade de armazenamento de energia do polímero pela alteração da sua conformação molecular e o solvente associado, diminuem a intensidade das microperturbações, que são, então, dissipadas pela ação viscosa do solvente. Desta forma, ao inibir a formação de pequenos vórtices, as moléculas de polímero alteram a estrutura da turbulência e, conseqüentemente, reduzem o arrasto.

O professor WALSH definiu um parâmetro adimensional H, como uma medida do efeito da solução polimérica sobre a difusão da turbulência, perto da parede do conduto, ou seja,

$$H = (8CM[\eta]^2\tau) / RT$$

onde c = concentração de polímero, τ = tensão de cisalhamento na parede, M = Peso molecular, R = constante dos gases, $[\eta]$ = viscosidade intrínseca do polímero e T = temperatura. WALSH previu que o início da redução de resistência ao arrasto deveria se dar quando $H = 0,01$. O máximo deveria ocorrer quando a razão de produção da turbulência se aproximasse da capacidade de armazenamento de energia do polímero, ou seja, quando $H = 1$. WALSH chegou a resultados bastante válidos com sua teoria, para soluções de PEO em água e poli(isobutileno) em ciclohexano testado em escoamento em conduto (Fig. 13).

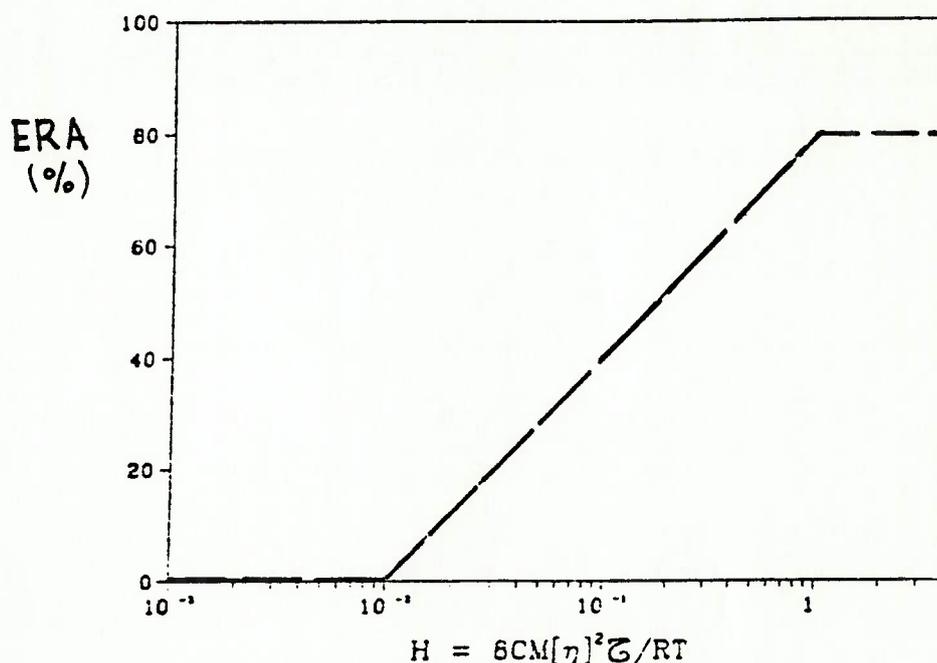


Figura 13 - Modelo de previsão da redução de arrasto segundo WALSH (extraído de ROUSE, 1983)

O Sr. M.C.KOHN (1973) sugeriu que as moléculas de polímero servissem como um "tanque de energia" no escoamento turbulento e reagissem a esforços localizados com modificações da sua conformação. Macromoléculas armazenam energia turbulenta por deformação e assim, estabilizam o escoamento. Quando removidas da zona de turbulência, as moléculas relaxam, liberam sua energia armazenada e estão novamente disponíveis para o processo de deformação/armazenamento de energia.

O Sr. KOHN define e propõe uma expressão para cálculo da energia armazenada nas moléculas de polímero deformadas por unidade de volume da mistura polimérica. A quantidade de energia armazenada W ("a densidade da energia de deformação") é dada por:

$$W = (CRT/2M) \sum_{i=1}^N [1 + (\bar{\tau} \cdot \Theta_i)^2]$$

onde N = número de segmentos estatísticos por molécula, $\bar{\tau}$ = tensão de cisalhamento na parede, e Θ_i = tempo de relaxação do i -ésimo modo de deformação. O cálculo de W é muito complexo; KOHN mostrou que em um dado sistema polímero/solvente, a correlação entre redução do arrasto e W era boa, e que o início de RA se dava a um valor constante de W . Contudo, cada sistema diferente polímero/solvente estudado, mostrava para o início um valor de W diferente, conforme quadro seguinte:

SISTEMA POLÍMERO/SOLVENTE	VALOR MÉDIO DE W AO INÍCIO DE RA (ERG/ML)
Poliisobutileno/benzeno	50
Poliisobutileno/ciclohexano	16
Poli(metil metacrilato)/tolueno	36
Poli(óxido de etileno)/água	0,02

Acredita-se que a variação de W seja função da "viscosidade interna" (força intramolecular) dentro de uma cadeia de polímero, que ocorre quando a cadeia é deformada da configuração de equilíbrio. Moléculas com estrutura rígida têm uma força interna maior do que as flexíveis.

Outros autores, além de KOHN e WALSH, ao optarem pela análise do balanço energético do escoamento da solução polimérica, sugerem modelos mais qualitativos que quantitativos, sendo úteis contudo, no seu entendimento e aplicação. É o caso da teoria baseada no modelo de turbulência de Kolmogorov. Nesse modelo cada espiral de polímero se comporta como uma pequena mola que quando deformada atinge uma dada energia elástica. Quando a energia elástica da molécula é igual à energia cinética da perturbação turbulenta, as moléculas de polímero suprimem a turbulência,

em locais de tamanho semelhante ao raio de rotação do polímero.

Este modelo, enunciado pelo professor P.G. DE GENNES permite definir os valores das concentrações máxima e mínima para a eficácia da redução do arrasto.

Para o entendimento deste modelo de previsão, consultou-se ORTIZ (1991) especialmente nos capítulos iniciais 1, 2 e 3 sobre modelos matemáticos da estrutura da turbulência.

3.2.5 Modelo de previsão baseados na multiplicidade dos mecanismos de redução de arrasto

A complexidade do fenômeno de RA fez alguns pesquisadores proporem mais de um mecanismo de redução do arrasto. O prof. N.S.BERMAN (1984) apresentou um modelo qualitativo no qual atuam três mecanismos diferentes, separados ou em conjunto: 1º) para moléculas isoladas de polímeros pode ser válido o mecanismo de aumento da viscosidade por alongamento molecular; 2º) para agregados de polímeros, as estruturas moleculares são maiores do que os micro-vórtices e suprimem as turbulências de pequena escala; 3º) as soluções concentradas de polímeros reduzem o arrasto pela modificação de macro-vórtices. BERMAN observa que a supressão da turbulência, ocorre provavelmente, ao mesmo tempo pelos três mecanismos e que seria difícil quantificar o efeito separado de cada um.

Não obstante a abundância de modelos propostos para a redução do arrasto, é provável que seja necessário considerar mais de um mecanismo para explicar melhor o fenômeno e assim, elementos dos vários modelos podem ser combinados para a consecução de um modelo mais abrangente de previsão da RA.

3.3 Equacionamento do fenômeno de redução do arrasto em condutos

Os modelos de previsão da redução de arrasto em condutos, descritos no item 3.2, constituem muito mais um esforço de compreensão dos fundamentos do fenômeno do que a tentativa de definir e disponibilizar equações para aplicação. Em alguns casos todavia, as expressões deduzidas representam modelos passíveis de utilização, como nos casos de VIRK e WALSH, desde que tal utilização seja precedida de grande conhecimento de características do polímero (e da solução polimérica) tais como peso molecular, estrutura da cadeia molecular, viscosidades e interação polímero-solvente além das condições do escoamento (faixas operacionais) e dados do conduto. Algumas destas variáveis, no entanto, somente poderão ser consideradas de forma qualitativa, em função do estágio atual de entendimento do fenômeno, que ainda não permite um equacionamento amplo, de todas as variáveis afetadas.

Todavia alguns autores citados pelo Sr. A.V.SHENROY (1989) optaram por métodos experimentais, partindo da expressão convencional do perfil de velocidade junto às paredes do conduto proposta por Newton e alterando-a para incorporar as novas variáveis da solução polimérica.

Os primeiros resultados são atribuídos ao prof. C.ELATA e colaboradores (1966), utilizando a solução polimérica goma-guar em água e medindo as velocidades por tubo Pilot. A expressão é:

$$U^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 + \alpha' \ln De$$

onde U^+ é a velocidade puntual adimensional μ/μ^* , sendo μ^* a velocidade de atrito, y^+ é a distância à parede adimensional $y \cdot \mu^*/\nu$, α' é um coeficiente empírico e De é o número adimensional de Deborah definido por:

$$De = \frac{\Theta \cdot \mu^{*2}}{\nu}$$

onde Θ é o tempo de relaxação molecular do polímero e ν a viscosidade cinemática da solução polimérica.

O Sr. W.A.MEYER (1966), propôs uma fórmula que modifica a equação de Newton e que é a seguinte:

$$U^+ = 2,5 \ln y^+ + \alpha^* \ln \left(\frac{\mu^*}{\mu^*_{crit}} \right)$$

onde μ^* é um coeficiente empírico e μ^*_{crit} é a velocidade de atrito no início da diminuição do arrasto.

Uma equação mais geral foi proposta por F.A. SEYER e A.B. METZNER (1969) na seguinte forma:

$$U^+ = A \ln y^+ + B$$

onde A é uma constante empírica e B uma expressão que depende do número de Deborah, cuja forma geral é:

$$B = \alpha + \beta De$$

onde α e β são constantes empíricas.

Todas as correlações citadas são baseadas na premissa de que a curva de perfis de velocidade da solução é similar à do solvente.

Todavia, como discutido no item 3.2, o comportamento RA da solução polimérica depende do tipo de polímero, concentração, número de Reynolds, características de degradação e características iônicas no caso do solvente ser água.

Dentro desta visão mais geral, P.S. VIRK (1975) propôs o modelo da sub-camada elástica ("buffer-layer"), baseado em observações físicas de que moléculas de polímero sujeitas a um escoamento turbulento induzem a formação desta sub-camada, a qual se origina no início ("onset") da RA, ficando mais espessa com o aumento de RA e ocupando completamente a seção do conduto na RA máxima. De acordo com este modelo, o perfil

de velocidades pode ser descrito por duas equações, conforme Figura 11:

a) Na sub-camada turbulenta central

$$U^+ = 2,5 \ln y^+ + 5,5 + 9,2 \ln \left(\frac{y_E^+}{y_{SL}^+} \right) \quad \text{com } y_E^+ \leq y^+ \leq R$$

onde y_E^+ e y_{SL}^+ estão definidos na Figura 11 e R é o raio do conduto circular.

b) Na "buffer-layer" ou região da assíntota de VIRK

$$U^+ = 11,7 \ln y^+ - 17,0 \quad \text{com } y_{SL}^+ \leq y^+ \leq y_E^+$$

Em relação aos desenvolvimentos mais recentes, merece destaque o trabalho dos prof. K.C.TAM, C.TIU e R.J.KELLER (1992). Estes autores desenvolveram, em bases empíricas, uma equação geral para os perfis de velocidade turbulenta em soluções poliméricas, baseando-se no modelo de comprimento de mistura de Prandtl. Foram utilizados 4 tipos de polímeros, executados inúmeros ensaios com anemometria a laser-doppler e ajustados polimônios de 2º grau, para os parâmetros α , β e T como função unicamente da relação entre a velocidade de atrito u^* e velocidade média \bar{u} , para a expressão geral seguinte:

$$\alpha (U^+ - T) + \beta = 2,43 \ln y^+ + 6,5$$

onde α , β e T são funções de $\frac{\mu^*}{\mu}$. Os autores constataram uma alta correlação para as funções definidas, constituindo-se numa maneira simples de previsão dos perfis de velocidade em condutos.

Finalmente, há que ressaltar a expressão atribuída a Y.A.VORTINSKAYA, que consta da edição espanhola do Hidráulica de E.Z.RABINÓVICH (1987). Discorrendo sobre métodos de diminuição de perdas de carga em condutos, é transcrita a fórmula seguinte:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\left(\frac{2,8 \mu_A}{\bar{\mu} \sqrt{f}} \right)^{\beta/5,75} \cdot \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{K_1}{3,7 D} \right) \right]$$

onde f é coeficiente de perda de carga distribuída, μ_A a velocidade no início da redução de arrasto, $\bar{\mu}$ velocidade média, Re número de Reynolds, K_1 rugosidade das paredes do conduto, d o diâmetro e β é um coeficiente que depende do tipo de polímero e de sua concentração. O autor destaca que, para a poliacrilamida, adota-se $V_A = 0,05$ m/s e β se determina pela expressão empírica $\beta = 1000 C$, onde C é a concentração volumétrica do polímero, expressão válida para valores de concentração entre 50 ppm e 120 ppm. Nesta expressão, quando a concentração de polímero é nula, a expressão se converte na fórmula de Colebrook.

Finalmente cabe salientar que estas expressões não esgotam o enorme conjunto de análises empíricas, modelos

matemáticos, estudos fenomenológicos, etc hoje em plena efervescência e capazes de gerar, a curto prazo, novas e significativas contribuições

3.4 Aplicações atuais do fenômeno da redução de arrasto em condutos

A referência bibliográfica mais abrangente acerca das aplicações do fenômeno redução de arrasto em condutos é, sem dúvida, a consolidação feita por R.H.I.SELLIN e colaboradores (1983). Neste artigo, além de listagem comentada das diversas aplicações existentes à época, são também comentados as tendências futuras.

Em todas as aplicações comentadas, o critério mais relevante para a decisão de adotá-la, foi sem dúvida, o dos benefícios econômicos decorrentes. Em diversos casos descritos, os benefícios auferidos referem-se desde a economia nos gastos com energia até ao adiamento de investimentos pelo aumento do desempenho das obras e equipamentos existentes.

Os casos principais de aplicações são oleodutos, coletores de esgoto, canais abertos, hidroelétricas, transporte de mistura sólido-água (minerais, areia, etc), redução de atrito e cavitação em turbomáquinas, aumento de rendimento dos rotores, centrais térmicas, combate a

incêndios, corte de materiais com jatos de solução polimérica, etc..

Ao final, esta publicação comenta que a ampliação dos usos desta técnica ensejam análises da possível toxicidade e outros efeitos ambientais decorrentes da presença de polímeros sintéticos na água. As análises já realizadas em laboratório, acerca da influência de polímeros nas atividades e ciclos de reprodução de animais, não mostraram evidência de influência.

Como referencial desta conclusão, deve-se ressaltar que os polímeros solúveis usados em tratamento de água são licenciados pelo E.P.A. Environmental Protection Agency/EUA, embora alguns países não adotam esta técnica de tratamento.

Uma outra referência bibliográfica para conhecimento das aplicações é a Encyclopedia of Fluid Mechanics (1989) que destaca, além daquelas já citadas, outras aplicações na área biomédica.

4. AS ADUTORAS DE ÁGUA BRUTA

4.1 Introdução

As adutoras de água bruta são projetadas exclusivamente em função de características hidráulicas, das condições econômico-financeiras, dos materiais constituintes e métodos construtivos, surgindo da interação destas variáveis a concepção, as diversas opções alternativas e finalmente o projeto. A adutora de água bruta é encarada, desta forma, como um meio de transporte, de um líquido com uma dada vazão a um determinado local, onde então iniciar-se-iam os processos de tratamento, para adequá-la às condições de qualidades requeridas pelos consumidores/usuários.

Esta divisão de funções é constatada claramente em sistemas públicos de abastecimento de água, onde as etapas de captação e adução de água bruta são projetadas independentemente da estação de tratamento; em alguns casos, são previstas caixas de sedimentação de areia nas estruturas de captação porém unicamente, com objetivo de proteger rotores das bombas, válvulas e tubulações de possíveis efeitos abrasivos. Embora os processos de tratamento variem grandemente, como exemplo das potencialidades desta abordagem integrada conduto-tratamento, basta mencionar que as etapas iniciais de tratamento de água (unidades de coagulação e floculação), necessitam misturas rápidas de aditivos que

reagem entre si e com certas substâncias contidas na água bruta; estas reações devem ter tempos de duração curtos (usualmente, da ordem de 1 minuto) e grande dispêndio de energia para agitação e mistura rápida, que são condições normalmente disponíveis em condutos de água bruta: tempos de escoamentos definidos e estrutura turbulenta dos escoamentos.

4.2 Polímeros como aditivos do processo de tratamento de águas de abastecimento

Os aditivos químicos usualmente empregados na etapa inicial do tratamento de água são os coagulantes e os floculantes. O objetivo desta etapa de tratamento é inicialmente promover a desestabilização das partículas contidas na água (através de um processo muito rápido chamado coagulação) e em seguida prover as condições necessárias para o encontro entre as partículas e sua aglutinação (através de um processo lento chamado floculação).

No caso de polímero constata-se a sua utilização como coagulante e auxiliar do processo de floculação nos seguintes casos, conforme afirma BRAULT (1991):

- a) na condição de coagulante inorgânico: é o caso dos polímeros de alumínio, largamente utilizados para tratamento de águas brutas com presença de colóides;

- b) na condição de floculante orgânico: são os casos dos polímeros naturais extraídos de matérias primas vegetais (amidos de batata, mandioca, etc) ou animais (geralmente polisacarídeos como goma-guar, goma-xanthan, gelatinas, derivados de celulose, etc), usados em tratamento de águas para abastecimento;
- c) na condição de coagulante orgânico-sintético: são os casos dos compostos de formol-melamina, pouco usado em tratamento de água e mais indicado para tratamento de esgotos industriais;
- d) na condição de floculante orgânico-sintético: são os casos dos polímeros poliacrilamida (PAM), poli(ácido acrílico) (PAA) e copolímeros de acrilamida, usados em tratamento de águas associado com um coagulante e também em tratamento de esgotos industriais e domésticos.

Acrescente-se que os polímeros são também usados como auxiliar de filtração, após o processo de decantação, para aumento das vazões do escoamento em meios porosos, característica dos filtros em estações de tratamento.

O prof. J.R.CAMPOS (1980) analisa e comprova a aplicabilidade de um polímero natural (biopolímeros), o amido de batata, como auxiliar de floculação para tratamento de águas para abastecimento doméstico, ressaltando que são muito mais econômicos do que os polímeros sintéticos, além de serem inócuos sob o ponto de vista dos parâmetros de potabilidade.

O prof. LUIZ DI BERNARDO (1993), por sua vez, afirma que com a utilização de polímeros, inclusive biopolímeros é possível reduzir "a dosagem de coagulantes primários e obter-se eficiências maiores em termos de turbidez remanescente, mesmo com velocidades de sedimentação mais elevadas".

Segundo o manual da empresa de consultoria norte-americana James M. Montgomery edição de 1985 (referência bibliográfica número 46), "embora polímeros tenham grande potencial de utilização em tratamento de água, seu uso tem sido restringido devido aos altos custos e incertezas em relação às impurezas químicas associadas com a síntese de polímeros. Estas incertezas motivaram a fixação de níveis de concentração máximos recomendados ou permitidos pelas agências governamentais dos Estados Unidos e exterior". A referida fonte afirma que "na França e Japão, polímeros orgânicos sintéticos normalmente não são permitidos em tratamento de água". Nos Estados Unidos contudo, mais de 600 polímeros foram aprovados pela E.P.A. para uso em potabilização de água para abastecimento.

Esta afirmação deve estar desatualizada pois contradiz outra afirmação de DI BERNARDO (1993) que na citada referência bibliográfica informa que recentemente "foi desenvolvida a preparação de compostos polímeros de ferro e alumínio, coagulante amplamente difundido no Japão". Outra explicação, além da possível desatualidade, seria a afirmação de que a referência 46 restringir-se-ia apenas a polímeros

orgânicos e não a todos os polímeros sintéticos solúveis em água.

Não obstante estas controvérsias, existe um consenso absoluto na afirmação de que os polímeros são cada vez mais utilizados em tratamento de água. Na Região Metropolitana de São Paulo, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP utiliza polímeros como auxiliar de floculação (mais especificamente uma poliacrilamida) em concentrações variando de 0,5 a 1,5 ppm, dependendo da qualidade da água bruta de cada manancial aproveitado.

4.3 Viabilidade de relocação do ponto de aplicação do polímero com dupla função: redução de arrasto e coagulante ou auxiliar de floculação

As adutoras de água bruta, em faixas de trabalho características de projeto, tem escoamento classificado como turbulento.

Os sistemas de tratamento de água por sua vez, utilizam polímeros naturais ou sintéticos, solúveis em água, de altos pesos moleculares e cadeias moleculares lineares ou ramificadas.

Desde que estes sistemas de adução e tratamento estão conectados e são seqüenciais, surge claramente a oportunidade de analisar, sob quais condições terá viabilidade relocar o ponto de adição de polímeros dos sistemas de tratamento de

água, para o início da adução de água bruta, de tal sorte que o polímero cumpra duas funções: como redutor de arrasto e como aditivo ao tratamento. Em sendo possível tal relocação, os ganhos podem estar relacionados com o menor dispêndio de energia na adutora e/ou na maior vazão aduzida.

Para que esta relocação seja possível, torna-se necessário pesquisar o tipo de polímero mais adequado para cumprir as duas funções, com o máximo desempenho em cada uma; para que esta relocação seja viável, será necessário avaliar benefícios e custos desta alteração: menor perda de carga no conduto, aumento das vazões aduzidas, custo dos polímeros, custo de instalações adicionais, etc.

Esta pesquisa do tipo do polímero e a avaliação benefício-custo da alteração poderão ser feitas através de modelos matemáticos associados a modelos físicos, com previsão de desempenhos de diversas variáveis tais como RA nos condutos, quantidades de material sólido removido por decantação, cor e turbidez remanescentes após a decantação, custos e benefícios totais envolvidos. A associação de modelos matemáticos e físicos, além de constituir a forma usual de análise dos fenômenos de RA, é também procedimento normal para definição dos aditivos, tempos de residência e de contato para coagulação e filtração. Neste caso, os parâmetros de qualidade da água bruta assumirão importância fundamental ao contrário da redução de arrasto, onde as interações polímero-água só afetam a ERA para águas com

partículas que "quebram" sua estrutura molecular (ver Figura 3 e item 2.1).

Trata-se então de propor modelo físico que integre os modelos matemáticos e os procedimentos já consolidados e que deve testar, em escala reduzida de laboratório e para a mesma qualidade da água bruta a ser tratada, as variáveis relacionadas com o escoamento no conduto e nas unidades de coagulação, floculação e decantação. Uma especial atenção deverá ser dada à seleção, dosagens, seqüência e pontos de aplicação dos aditivos químicos, que deverão considerar a aplicação prévia de polímero redutor de arrasto e, coagulante e/ou floculante no ponto inicial da adução.

Desta forma, a redução de arrasto nas adutoras de água bruta deixaria de ser o objetivo único, ao considerar outras variáveis relativas ao sistema de tratamento. Não obstante este aspecto, o aumento da vazão aduzida sem alteração dos padrões de qualidade da água decantada, é o que pode ser sintetizado como o objetivo central desta análise.

5. PROPOSTA DE ENSAIO EM LABORATÓRIO

Para a elaboração de uma proposta de ensaio de modelo reduzido em laboratório, julgou-se necessário considerar aspectos econômicos e tecnológicos. Para uma concepção econômica da instalação, decidiu-se optar por aparelhos e equipamentos convencionais. Quanto aos aspectos tecnológicos, a opção consistiu em conhecer as condições operacionais de sistemas existentes de adução e tratamento de água tanto ao nível da qualidade da água bruta como dos processos adotados. Espera-se, desta forma, realizar um projeto de pesquisa que tenha condições de alterar e melhorar os procedimentos adotados em sistemas já em operação ou até mudar critérios de projetos para novos sistemas.

5.1 Objetivos

Constituem objetivos desta proposta os seguintes itens, o estudo de um modelo reduzido em laboratório:

- medir a perda de carga distribuída em conduto, com fluído água bruta, com e sem adição de polímeros, de diversos tipos e em várias concentrações;
- medir a turbidez e a cor remanescentes do processo de coagulação, floculação e decantação, com e sem presença de polímeros na água bruta e para várias

seqüências, dosagens e tipos de coagulantes e floculantes;

- avaliar os benefícios e custos associados em relação ao consumo de energia, ao aumento da vazão, aos custos dos polímeros, aos custos dos aditivos, etc;
- associar a eficiência de redução de arrasto (ERA) do conduto ao conjunto de parâmetros ensaiados, utilizando a discussão relativa aos diversos modelos de previsão, conforme descrição nos itens 3.2 e 3.3.

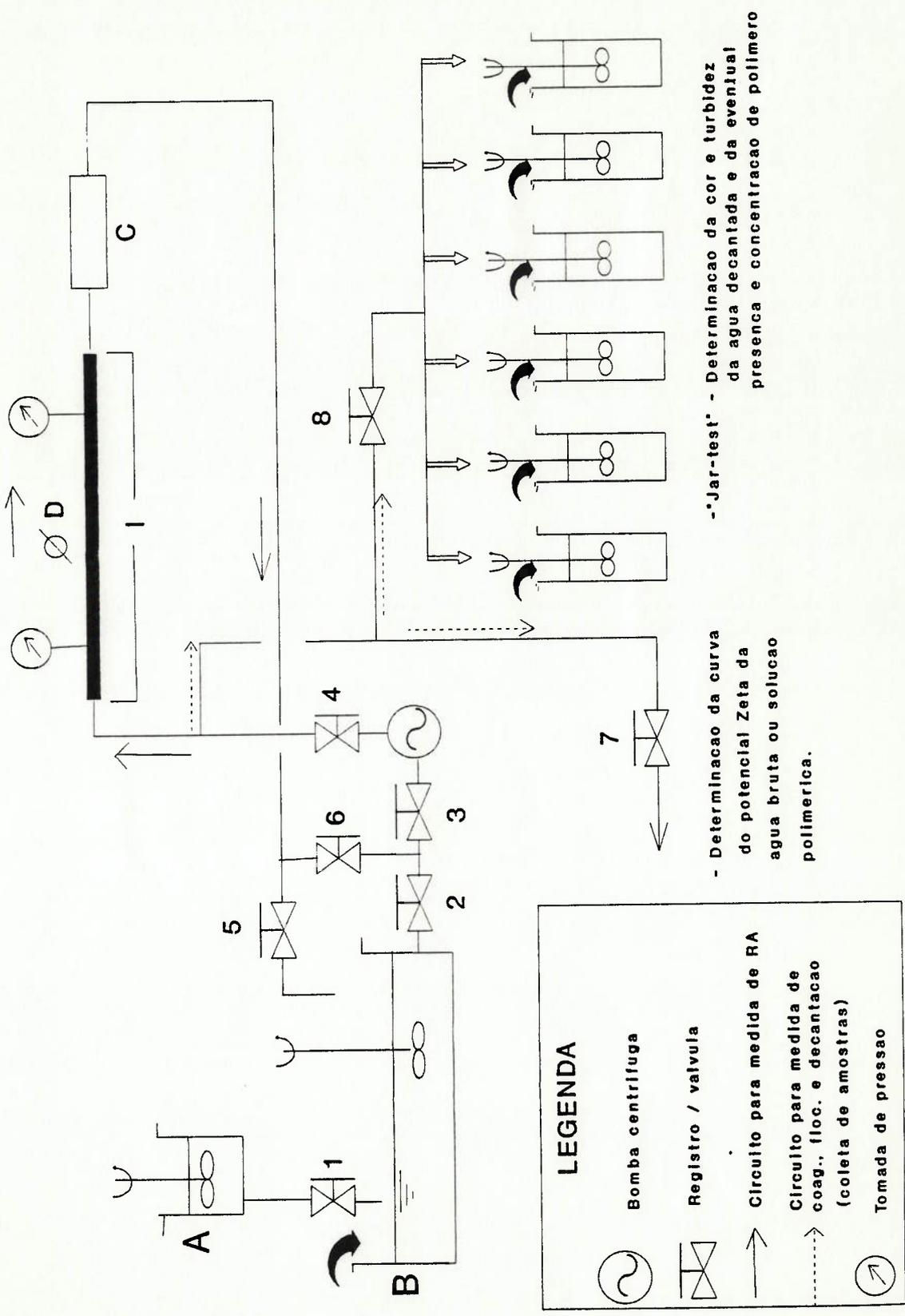
5.2 Descrição do arranjo básico das instalações

O arranjo básico das instalações consiste em um circuito fechado com fluído água bruta mais polímero para medida de redução de arrasto, com a coleta prévia de amostra da solução para determinação do potencial zeta e para ensaio de coagulação-floculação-decantação.

Os componentes e suas funções neste arranjo básico são os seguintes, conforme Figura 14:

- dois tanques para armazenamento de soluções poliméricas concentrada (tanque A) e diluída (tanque B), dotados de agitadores para mistura e homogeneização da solução; no caso do tanque B, é possível concentração nula (ou só água bruta) pelo fechamento do registro 1;
- registros 2 e 3 na tubulação de sucção e 4 na de recalque;

FIGURA 14: Arranjo basico das instalaçoes em laboratorio



- um conjunto motor-bomba centrifuga para recalcar uma determinada vazão de água bruta ou da solução polimérica, pelo circuito com trecho de conduto de diâmetro dado e duas tomadas de pressão a uma distância conhecida; desde que se queira garantir nenhuma degradação das moléculas de polímero no rotor de bomba, deve-se optar pela elevação do tanque B para aduzir a vazão de ensaio por gravidade;
- medidor de vazão em C;
- registro 5 para controle da vazão do ensaio RA;
- registro 6 para ensaio de degradação do polímero, mediante fechamento dos registros 2 e 5;
- registro 7 para coleta de amostra da água bruta ou solução polimérica visando determinar a curva do potencial zeta pela técnica da eletroforese, que consiste na avaliação da velocidade das partículas coloidais pela adição de coagulantes;
- registro 8 para coleta de amostra para realização do "jar-test", onde 6 jarros idênticos de volume iguais são submetidos à agitação mecânica com rotações idênticas por cerca de 20 minutos, ao final dos quais podem ser medidas a cor e turbidez da água decantada e a eventual presença e concentração de polímeros.

5.3 Equipamentos e procedimentos de medição

São os seguintes os equipamentos e procedimentos de medição propostos para o arranjo básico das instalações.

- a) Tomada de pressão: deverá ser da forma indicada na Figura 15, com um furo rosqueado para adaptação de pequeno registro ligado por tubo látex a um multimanômetro. O dispositivo de tomada de pressão deverá assegurar a invariabilidade da largura da fenda, ou seja, $e < a.b/D$

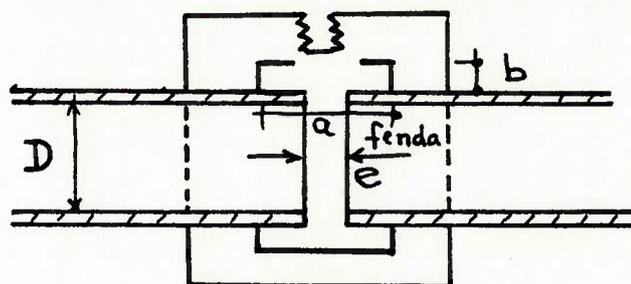


Figura 15 - Tomada de pressão

- b) Medida de vazão: tendo em vista a necessidade de executar vários testes para a mesma concentração da solução polimérica, visando avaliar eventuais efeitos da degradação das moléculas do polímero, optou-se por medidor

de vazão diferencial tipo Venturi, com ângulo de saída de 15 e garantindo a máxima precisão de medida de vazão.

- c) Dimensões dos condutos: 1) comprimentos: podem ser medidos com grande precisão, com erros menor que 1^o/100; 2) diâmetros: como na maioria das vezes, os diâmetros reais diferem bastante dos diâmetros nominais e intervêm com a quinta potencia para o cálculo da perda de carga em escoamentos turbulentos e que, porisso, um erro na admissão do diâmetro acarreta, sobre o coeficiente de perda de carga distribuída f , um erro, cinco vezes maior, há que determiná-lo pelo único método plausível, que consiste em dividir o volume interno do conduto pelo seu comprimento. Este volume é determinado por enchimento do conduto, com capacidades conhecidas e previamente pesadas e por esvaziamento do conduto, recolhendo o líquido para pesá-lo em seguida. A média de volumes afetada de uma eventual correção tendo em conta a variação do peso específico em função da temperatura, dá o volume exato e daí o diâmetro; 3) rugosidade uniforme, equivalente: será determinada por via hidráulica, fazendo crescer o número de Reynolds até se obter f constante e deduzir K , com o auxílio da fórmula de Colebrook para tubos rugosos.
- d) Tipo e concentração de polímero: deverão ser conhecidos os parâmetros do polímero (normalmente fornecidos pelos

produtores) tais como peso molecular, viscosidades dinâmica, relativa, específica, inerente e intrínseca, tempo de relaxação e estrutura e conformação da cadeia molecular. Em relação à concentração, deve-se adotar o critério da relação entre massa do soluto e o volume da solução.

- e) Tipos e dosagens de coagulantes e floculantes: da mesma forma que os polímeros, os fabricantes normalmente fornecem as características dos coagulantes e floculantes tais como massa específica, concentrações disponíveis, velocidades das reações, faixas de aplicação dependendo da água bruta, etc.
- f) Características da água bruta: devem ser determinadas as características físicas, químicas e biológicas da água bruta, tendo em vista principalmente a medida e qualificação da cor e turbidez, a determinação do potencial zeta, a existência e as fontes de matéria orgânica (algas, húmus, etc) em concentrações significativas, etc.
- g) Características da água decantada: devem ser determinadas as características físicas e químicas da água decantada, em especial, a cor e turbidez remanescentes, a presença e concentração do polímero, etc.

h) Custos unitários associados aos processos de redução de arrasto e coagulação, floculação e decantação: referem-se aos custos de energia, da água tratada e dos vários compostos químicos.

6. CONCLUSÕES

Não obstante a impossibilidade de realização de ensaio para esta dissertação de mestrado, é inconteste, que a partir deste trabalho vislumbra-se, com riqueza de detalhes, a complexidade e enorme potencialidade do fenômeno de redução de arrasto mediante adição de polímeros.

Com este trabalho é possível conhecer o conjunto de pesquisadores do exterior que, contemporaneamente, estão trabalhando neste tema, com grandes recursos tecnológicos e financeiros.

Conclui-se também deste trabalho a possibilidade de ser criada linha de pesquisa de redução de arrasto na Universidade de São Paulo, já que o arranjo básico de instalações de laboratório proposto, é viável econômica e tecnologicamente, e além disso e principalmente, constitui matéria de mais alta relevância para a sociedade brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSY, T.M. *Mecânica dos Fluidos*, Ed. G. Politécnico, 1989.
2. BERMAN, N.S. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 10, Annual Reviews Inc., Palo Alto, Califórnia, 1978.
3. BERMANI, N.S. *Proceedings of Third International Conference on Drag Reduction* (R.H.J.SELLIN e R.T.MOSES, editores), Bristol, Inglaterra, 1984.
4. BEWESDORFF, H.W. *Rheological Acta*, Vol. 23, EUA, 1984.
5. BIKALES N.M. (editor), *Characterization of Polymers*, John Wiley, Canadá, 1971.
6. BLOCK, H. *Molecular Behaviour and Development of Polymeric Materials* (A. LEDWITH e A.M.NORTH, editores), John Wiley and Sons, New York, 1975.
7. DODGE, D.W. e METZNER, A.B. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, Vol. 5, EUA, 1959.
8. DODGE, D.W. *Ph. D. Dissertation*, University of Delaware, EUA, 1958.
9. FRANK, H.S. *Proceedings of the Royal Society of Chemistry*, vol. A247, Inglaterra, 1958.
10. FRANKS, F. Ed. *Water. A Comprehensive Treatise*, Vol. 4, Plenum Press, New York, 1975.
11. HLAVACEK, B. ROLLIN, L.A. e SCHREIBER, H.P. *Polymer*, Vol. 17, EUA, 1976.

12. HOYT, J.W. Drag Reduction, Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 5, EUA, 1986.
13. HOYT, J.W. e FABULA, A.G. Proceedings - 10th International Towing Tank Conference, Teddington, EUA, 1963.
14. HOYT, J.W. e FABULA, A.G. Proceedings - Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Noruega, 1964.
15. HOYT, J.W. Swimming and Flying in Nature (TIT.WU, C.J. BROKAW e C.BRENNAR, Ed.), pag.653, Plenum Press, New York, 1975.
16. HOYT, J.W. Transactions of American Society of Mechanical Engineers, Journal of Basic Engineering, Vol. 94, 1972.
17. HOYT, J.W., FABULA, A.G. e CRAWFORD, H.R. Bulletin of American Physical Society, Vol. 8, EUA, 1963.
18. JELLINEK, H.H.G. Water Structure at the Water - Polymer Interface, Plenum Press, New York, 1972.
19. KOHN, M.C. Energy Storage in drag - reducing polymer solutions, Journal of Polymer Science, vol. 11, EUA, 1973.
20. KULICKE, W.M. e GRAGER, H. Proceedings of Third International Conference on Drag Reduction (R.H.J. SELLIN e R.T. MOSES, editores), Bristol, Inglaterra, 1984.
21. LEDWITH, A. e NORTH, A.M. (editores) Molecular Behaviour and the Development of Polymeric Materials, John Wiley and Sons, Nova York, EUA, 1975

22. LUMLEY, J.L., FABULA, A.G. e TAYLOR, W. D. **Modern Developments in the Mechanics of Continua**, Academia Press, Nova York, EUA, 1966.
23. LUMLEY, J.L., LANDAHL, M. e FRENKIEL, F.N. (editores), **Proceedings of the Symposium of Structure of Turbulence and Drag Reduction**, American Institute of Physics, Nova York, USA, 1976.
24. MANO, E.B. **Introdução a Polímeros**, Editora Edgard Blücher Ltda, 1985.
25. MATSUKHOV, A.P., MIRONOV, B.P. e ANISIMOV, I.A. **The Influence of Polymer Additives on Velocity and Temperature Fields** (B. GAMPER, editor), Springer-Verlag, Brelim, 1985.
26. McCOMB, W.D. e RABIE, L.H. **American Institute of Chemical Engineering Journal**, Vol. 14, EUA, 1982.
27. McCORMICK, C.L., HESTER, R.D., MORGAN S.E. e SAFIEDINE, A.M., **PMSE**, Vol. 57, EUA, 1987.
28. MOLYNEUX, P. **Water Soluble Synthetic Polymers**, Vol. I e II, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1983.
29. MORGAN, S.E. e McCORMICK, C.L. **Water - Soluble Copolymers Macromolecular drag reduction predictive theories**. Pergamon Press, Inglaterra, 1990.
30. MYSELS, K.J. **United States Patent nº 2.492.173**, EUA, 1949.
31. NEHMI, V.A. **Química Geral**, Vol. 2, 1965.
32. ORTIZ, J.P. **Dissertação de Doutorado**, USP, 1991.

33. PFENNINGER, W. Northrop Corporation, Norair Division Report BLC-179, EUA, 1967.
34. RABINÓVICH, E.Z. Hidráulica. Editorial MIR, Rússia, 1987.
35. RICHARDS, E.G. An introduction to the physical properties of large molecules in solution, Cambridge University Press, EUA, 1980.
36. ROCHEFORT, W.E. e MIDDLEMAN, S. Conference Proceedings, nº 137, Polymer Flow Internactions (Y.RABIN, ed.), p.117, La Tolla, EUA, 1985.
37. ROCHEFORT, W.E. Ph.D. Dissertation, University of Califórnia, San Diego, 1986.
38. SELLIN, R.H.J, HOYT, J.W., POLLERT, J. e o SCRIVENER, Journal of Hydraulic Research, vol. 20, nº 3 parte 2. 1982.
39. SELLIN, R.H.J. e HOYT, J.W. e SCRIVENER, O. Journal of Hydraulic Research, Vol. 20, nº 3, partes 1, 1982.
40. SHAVER, R.G. e MERRILL, E.W. American Institute of Cheminal Engineering Journal, Vol. 5, EUA, 1959.
41. SHENOY, A. V. Turbulente Flow Velocity Profides in Drag - Reducing Fluids, Capítulo 16, Encyclopedia of Fluid Mechanics, Grulf Publ. Co, Texas, USA, 1989.
42. TAM, K.C., TIU, C. e KERLLER, R.J. A general correlation for turbulent velocity profiles of dilute prolymer solutions, Journal of Hydraulic Research, vol. 30, 1992.
43. TOMS, B.A. Proceedings of International Congress on Rheology. Vol. II p. 135 North Holland, Amsterdam, Holanda, 1949.

44. VIRK, P.S. American Institute of Chemical Engineering Journal, VOL. 21, EUA, 1975.
45. WALSH, M. Ph. D. Dissertation, California Intitute of Technology, Pasadena, California, 1967.