

GUILLERMO VILALTA ALONSO

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS
POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS: ENSAIOS EXPERIMENTAIS
COM SOLUÇÕES DE POLIACRILAMIDA**

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

São Paulo
1995

GUILHERMO VILALTA ALONSO

**ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS
POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS: ENSAIOS EXPERIMENTAIS
COM SOLUÇÕES DE POLIACRILAMIDA**

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

Área de Concentração :
Engenharia Mecânica

Orientador:
Jayme Pinto Ortiz

São Paulo
1995

À minha esposa Regina,
aos meus pais,
aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS.

Um trabalho de pesquisa não pertence sómente a uma pessoa. Este não é uma exceção.

Primeiramente agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz, que fez possível minha vinda ao Brasil dirigindo este trabalho com sabedoria, propondo um tema de muita importância econômica para Cuba e para o Brasil.

Ao Eng^o. Carlos Alberto Nunes e às Indústrias Químicas Arujá Ltda pelo fornecimento do polímero e pela colaboração em alguns "temas" químicos, além do tempo que muitas vezes dedicou-me pacientemente.

À equipe do Centro Tecnológico de Hidráulica integrada pelo Prof. Dr Takashi Nakae, o Eng^o. Emygdio Spegiorin, o Eng^o Kendhi Yamamoto e o Técnico Getulio Justo Barbieri, os quais deram uma decisiva contribuição durante a realização dos ensaios. Reconheço especialmente ao Prof. Nakae, que desinteressadamente liberou a bancada dando as facilidades e ajuda técnica no período de testes, ao Sr Emygdio que "desenrolou todas as travas" que na prática diaria apareceram e Barbieri, minha mão direita nas medições e na difícil tarefa de preparar as soluções poliméricas.

Parágrafo aparte ao meu amigo Regino, imprescindível na minha vinda e nos primeiros momentos quando as dificuldades tentavam se apoderar de mim. Sua ajuda sempre esteve à minha mão. Não esqueço também ao Miguel e a Ida, matrimônio cubano, os quais fizeram da sua casa minha segunda moradia.

Aos estudantes cubanos da U.S.P. conhecidos lá ou aqui, não importa. A união da comunidade cubana permitiu-me enfrentar a grande diversidade de problemas: temas técnicos, computação, idiomas e muitos outros. Ora um, ora outro, todos contribuíram e tem aqui o seu grão de areia.

Aos meus amigos brasileiros pela ajuda em todo momento. Sabanai, Rogério, Pacífico, Renato e Gregório, Obrigado.

Corro o risco de esquecer alguns nomes. Não me julgem. Hoje e no futuro sempre estarei lembrando de vocês, pela amizade, pelo jeito carinhoso com que o Brasil me recebeu e pelas grandes oportunidades que tive aqui.

OBRIGADO A TODOS

SUMÁRIO.

Lista de figuras.

Lista de fotos.

Lista de tabelas.

Lista de abreviaturas mais usadas.

Lista de símbolos.

Resumo.

Abstract.

1. Introdução	1
2. Revisão bibliográfica	7
2.1. Redução de arrasto por adição de polímeros.....	7
3. O fenômeno da redução de arrasto	22
3.1. Introdução	22
3.2. O início da Redução de Arrasto.....	25
3.3. Modelos de previsão da redução de arrasto	27
3.3.1. Modelos de previsão baseados nas alterações da perda de carga do escoamento turbulento (modelos de energia).....	27
3.3.2. Modelos de previsão baseados no comprimento das moléculas do polímero (escala de comprimento).....	28
3.3.3. Modelos de previsão baseados no tempo de relaxação do polímero (escala de tempo).....	30
3.3.4. Modelos de previsão baseados na multiplicidade dos mecanismos da R.A.....	30
4. Polímeros.....	32
4.1. IQAPOL PA	34
4.1.1. Preparo da solução polimérica.....	35

5. Bancada experimental	38
5.1. Descrição da bancada experimental	38
5.2. Calibragem.....	40
5.2.1. Calibragem do medidor de vazão.....	40
5.2.2. Calibragem dos transdutores de pressão.....	40
5.2.3. Diâmetro da tubulação	41
5.2.4. Rugosidade da tubulação.....	41
5.3. Seções de testes	42
6. Análise dos resultados.....	45
6.1. Considerações gerais.....	45
6.2. Análise da degradação mecânica por cisalhamento.....	46
6.3. Determinação do gráfico de f vs Re	52
6.4. Coeficiente de atrito.....	58
6.5. Verificação da equação de Vortinskaya	62
6.6. Correlação geral de Tam.....	67
7. Conclusões	70
Anexos	73
Anexo I.....	74
Anexo II-A	85
Anexo II-B	89
Anexo III.....	91
Referências bibliográficas.....	96

LISTA DE FIGURAS.

- Fig.(1.1) Representação das opções para a diminuição do coeficiente de perda de carga por atrito.
- Fig.(5.1) Esquema geral da bancada experimental.
- Fig.(5.2) Esquema das seções de testes 1 e 2.
- Fig.(5.3) Esquema das seção de teste 3.
- Fig.(6.1) Perfil de velocidade adimensional para 10 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.
- Fig.(6.2) Perfil de velocidade adimensional para 50 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.
- Fig.(6.3) Perfil de velocidade adimensional para 70 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.
- Fig.(6.4) Perfil de velocidade adimensional para 110 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.
- Fig.(6.5) Perfil de velocidade adimensional para 5 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.
- Fig.(6.6) Perfil de velocidade adimensional para 50 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.
- Fig.(6.7) Perfil de velocidade adimensional para 70 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.
- Fig.(6.8) Resultados comparativos do perfil de velocidade adimensional para o IQAPOL PA e para outro tipo de poliacrilamida (tomado de Tam et al 1992).
Note-se a A.M.R.A.
- Fig.(6.9) Variação do coeficiente de atrito f para diferentes concentrações de polímeros.

- Fig.(6.10) Relação entre a Eficiência da Redução de Arrasto (ψ) e a concentração para diferentes valores de Re.
- Fig.(6.11) Gráfico para determinar o coeficiente A.
- Fig.(6.12) Gráfico para determinar o coeficiente B.
- Fig.(6.13) Diagrama que mostra a comparação dos resultados experimentais e os obtidos pela equação (6.2).
- Fig.(6.14) Diagrama que mostra o início da R.A por extrapolação gráfica.
- Fig.(6.15) Representação gráfica da variação de C_f vs Re para várias concentrações e uma vazão de 20 l/s.
- Fig.(6.16) Relação entre o coeficiente Γ e a concentração.
- Fig.(6.17) Perfil de velocidades adimensional segundo o modelo da S.C.E de Virk.
- Fig.(6.18) Comparação dos coeficientes "f" para 50 ppm determinados por 3 vias.
- Fig.(6.19) Comparação dos coeficientes "f" para 70 ppm determinados por 3 vias.
- Fig.(6.20) Comparação da aplicação da Correlação de Tam a os presentes resultados experimentais para 50 ppm.
- Fig.(6.21) Comparação da aplicação da Correlação de Tam a os presentes resultados experimentais para 70 ppm.

LISTA DE FOTOS.

- Foto (III.1) Vista lateral da seção de teste 1. Observe-se em primeiro plano a tomada de pressão e à direita o transdutor de pressão.
- Foto (III.2) O transdutor de pressão. Observe-se à esquerda as conexões às tomadas de pressão e à direita (cabo preto) a conexão ao sistema de aquisição de dados.
- Foto (III.3) Transdutor de pressão nas seções 1 e 2.
- Foto (III.4) Vista geral da bomba centrífuga desmontada.
- Foto (III.5) Rotor da bomba revestido com borracha natural para evitar o desgaste por erosão.
- Foto (III.6) Medidor eletromagnético de vazão.
- Foto (III.7) Vista geral do tubo de Pitot.
- Foto (III.8) Vista da seção de ensaio 3, para medição do perfil de velocidades.

LISTA DE TABELAS.

Tabela (6.1) Resultados da comparação dos coeficientes f para 50 ppm.

Tabela (6.2) Resultados da comparação dos coeficientes f para 70 ppm.

ABREVIATURAS MAIS USADAS.

A.M.R.A.	Assíntota de Máxima Redução de Arrasto.
P.A.M.	Poliacrilamida.
P.E.O.	Óxido de Polietileno.
R.A.	Redução de Atrito; Redução de Arrasto.
S.C.E	Subcamada Elástica.

LISTA DE SÍMBOLOS.

A	Área de seção transversal da tubulação.
C	Constante do Tubo de Pitot.
C_D	Coefficiente de arrasto.
C_f	Coefficiente de atrito.
C_w	Concentração da solução polimérica.
D	Diâmetro interior da tubulação.
D_m	Diâmetro efetivo da molécula em solução.
E.R.A.	Eficiência da Redução de Arrasto.
e	Rugosidade absoluta da tubulação.
e^+	Rugosidade adimensional. $e^+ = \frac{e \cdot u_*}{v}$.
f	Coefficiente de perda de carga.
F_D	Força de arrasto.
g	Aceleração da gravidade.
l	Comprimento de mistura de Prandtl.
L	Comprimento da tubulação.
L_w	Escala de comprimento do escoamento.
L_m	Raio de giração das moléculas do polímero.
M_w	Peso molecular.
n	Referido ao número de ensaios.
P	Pressão dinâmica média.
p	Flutuação da pressão dinâmica.
Q	Vazão volumétrica.
Re	Número de Reynolds.
R	Raio da tubulação, Constante universal dos gases.

t	Tempo, Tempo de ensaio (Fig. (6.1)-(6.7)).
T	Temperatura.
T_m	Escala de tempo do escoamento.
T_w	Tempo de relaxação molecular do polímero.
S	Taxa média de deformação.
s	Flutuação da taxa de deformação.
u_*	Velocidade de atrito.
\bar{U}	Velocidade média local na direção do escoamento.
U	Velocidade instantânea do escoamento na direção deste.
$\langle U \rangle$	Velocidade média do escoamento na seção.
u	Flutuação da velocidade local na direção do escoamento.
u'	R.M.S da velocidade.
U^+	Velocidade local adimensionalizada.
p.p.m	Partes por milhão (referido ao peso molecular).
Y^+	Distância adimensionalizada.
y	Distância medida desde a parede da tubulação até um ponto qualquer.
W^*	Número de ondas.
V	Tensão lida no sistema de aquisição de dados nos diferentes instrumentos.

LETRAS GREGAS.

α	Coeficiente na equação (6.17).
β	Coeficiente na equação (6.18).
δ	Aumento da declividade.
δ^*	espessura de deslocamento.
$[\eta]$	Viscosidade intrínseca.
ϕ	Declividade no perfil adimensional de velocidades.
γ	Peso específico.
μ	Viscosidade dinâmica do fluido.
ν	Viscosidade cinemática do fluido.
ρ	Massa específica do fluido.
θ	Tempo de relaxação da molécula do polímero.
τ	Tensão de cisalhamento.
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões.
τ_w^*	Tensão de cisalhamento na parede no início da Redução de Arrasto.
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede.
ΔP	Queda de pressão.
ΔH	Altura de pressão medida nos transdutores na bancada experimental.
Δh	Altura de pressão medida no tubo de Pitot.
Ω	Valor médio da vorticidade.
ω	Valor das flutuações da vorticidade.
$\bar{\omega}$	Vorticidade instantânea.
ψ	Eficiência da Redução de Atrito.

- Γ Redução do coeficiente de atrito, coeficiente da equação (6.19).
 ε Coeficiente na equação (6.16).

SUBSCRITOS.

- p Referido ao polímero.
w Parede.
n Newtoniano.
o Valor da tensão lida nos transdutores de pressão para vazão zero (0).
s Solvente.
es Referido ao Regime Liso Efetivo.
c Linha central da tubulação.
i, j, k Tratamento tensorial, Relativo a um número de ensaios.

RESUMO.

Neste trabalho é analisada a Redução de Atrito (R.A.) causada por soluções poliméricas (água e poliacrilamida) de IQAPOL PA de peso molecular $1.7 \cdot 10^6$ em um escoamento turbulento em tubulação de P.V.C. de 102.95 mm de diâmetro interior. Devido à adição do polímero, verifica-se uma diminuição dos coeficientes de perda de carga f e de atrito C_f , diminuição esta da ordem de 30 % para valores de $Re = 5 \cdot 10^5$ e concentração maior que 70 ppm. Apresenta-se uma equação para determinar f como uma função do número de Reynolds e da concentração com diferenças médias na faixa de 7-9 % com relação aos dados experimentais. Determinou-se que durante os ensaios, não existe influência da degradação mecânica do polímero. Os pontos referidos ao início da R.A. foram obtidos por extrapolação gráfica, não sendo possível obter elementos para a análise da Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A.). Fez-se uma avaliação a equação de Vortinskaya, da literatura, sendo que a diferença desta, com os resultados experimentais e com os resultados da equação proposta neste trabalho, estão em uma pequena faixa de erros (≈ 10 %). Comprovou-se que, nas faixas dos ensaios realizados, a correlação geral de Tam não é válida.

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que o IQAPOL PA é um redutor de arrasto médio para as condições estudadas.

ABSTRACT.

In this work was analysed the drag reduction caused by polymeric solutions (water and polyacrilamide) of IQAPOL PA with a molecular weight of $1,7 \cdot 10^6$ in a turbulent flow within a P.V.C tube with an inner diameter of 102.95 mm.

Due to polymer addition, a diminishment on both head loss and drag coefficients (f and C_r , respectively) was verified. For values of $Re = 5 \cdot 10^3$ and concentration higher than 70 ppm, this diminishment was within range of 30 %.

It is presented an equation for the determination of f , as a function of Reynolds number and concentration with average differences within the range of 7-9 % as regarded to the experimental data.

During the experiments it was determined that there are no influence in the results from the polymer mechanical degradation.

The points referred to the onset of drag reduction were obtained by means of graphical extrapolation. It was not possible to obtain elements for the analysis of the Maximum Drag Redution Assymptote (M.D.R.A.).

From the literature, Vortinskaya's equation was estimated. The differences between the results obtained by this equation and either the experimental results or the results from the present work proposed equation, were roughly around 10 % within the range of the experiments developed here. It was confirmed that the Tam's general correlation was not valid.

As far as the results obtined here are concerned, it can be concluded that IQAPOL PA is a medium drag reductor under the studied conditions.

1. INTRODUÇÃO.

A diminuição do consumo de energia, em qualquer fenômeno da vida cotidiana, constitui-se em um importante tópico de pesquisa, o que se reflete a partir dos inúmeros trabalhos realizados e registrados na bibliografia científica.

Ao estudar o comportamento de um escoamento por uma tubulação cilíndrica, deve-se levar em conta que ele vai estar caracterizado por elementos próprios do conduto (diâmetro interior e rugosidade) e também por aspectos vinculados ao escoamento (velocidade média, viscosidade e gradiente de pressão).

Na área de Mecânica dos Fluidos, trabalha-se intensamente na redução do coeficiente de perda de carga por atrito, "f", onde sabe-se que, com a adição de certas substâncias a um escoamento turbulento, pode-se diminuir consideravelmente a resistência. A resistência ao escoamento numa tubulação está caracterizada pelo coeficiente de perda de carga, como uma função do número de Reynolds (efeito provocado pelas condições do escoamento) e da rugosidade (influência da tubulação). Quanto maior for este parâmetro, maior serão as perdas associadas ao sistema e conseqüentemente maiores serão os prejuízos econômicos: consumo de potência, menores vazões etc.

Uma análise do Diagrama de Moody (vide Fig. 1.1) mostra que os maiores valores de f , são obtidos para baixos valores do número de Reynolds. Isto pode sugerir duas opções para poder diminuir este valor:

- 1) Aumentar o valor do número de Reynolds, o que pode provocar uma diminuição de f da ordem de 10-20 %, levando em consideração que as características do sistema são constantes (D e e/D).
- 2) Adicionar substâncias, que ao mesclar-se com o solvente, provoquem a diminuição de f e portanto do atrito.

Considerando estes aspectos, e levando em consideração o uso cada vez maior de

polímeros como agentes redutores de arrasto, definem-se os seguintes objetivos, para o trabalho aqui apresentado:

- 1) Obtenção da variação do coeficiente de perda de carga, f , e do coeficiente de atrito, C_f , em função do número de Reynolds, para diferentes concentrações de soluções poliméricas de poliacrilamida (IQAPOL PA) em escoamentos hidráulicamente lisos em regime turbulento.
- 2) Determinação dos aspectos gerais dos limites da redução de arrasto .
- 3) Verificação da equação de Vortinskaya para a determinação do coeficiente de perda de carga f , em soluções redutoras de arrasto.
- 4) Breve análise sobre a "generalidade" da correlação de Tam et al (1992).

Embora não como um objetivo principal deste trabalho, serão feitos experimentos para definir a degradação mecânica das soluções por cisalhamento. Estes experimentos são importantes, porque permitem obter o tempo máximo de ensaio sem que as soluções percam

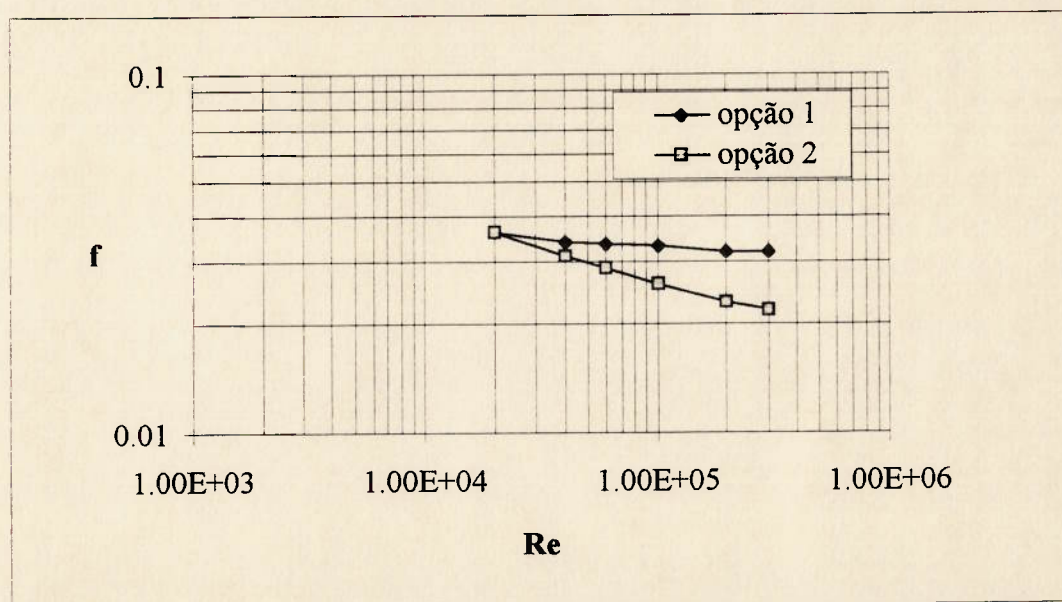


Fig.1.1 Representação das opções para a diminuição do coeficiente de perda de carga por atrito

a sua efetividade, ou seja, a sua capacidade redutora.

No estudo da teoria da camada limite, normalmente é importante definir a força de arrasto, F_D , que atua sobre as fronteiras sólidas imersas em uma corrente fluida, e consequentemente os respectivos coeficientes de arrasto, C_D , sendo:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 A} \quad (1.1)$$

Apesar do termo "drag reduction" (literalmente traduzido como redução de arrasto) relacionar-se, a princípio, com a diminuição do coeficiente de arrasto, C_D , ao longo de nossa revisão bibliográfica encontramos que este termo está muito mais associado à redução do coeficiente de perda de carga por atrito, f , e do coeficiente de atrito, C_f , coeficientes estes de maior interesse na análise do escoamento turbulento em condutos forçados.

Defini-se portanto neste trabalho, Redução de Arrasto ou Redução de Atrito (R.A.) como qualquer modificação em um escoamento que resulte numa diminuição da taxa de perda de energia.

As primeiras noções sobre este efeito foram registradas no final da década de 1940, ocasião em que **B.A.Toms (1949)** demonstrou sistematicamente que o escoamento de soluções poliméricas (soluções diluídas de polimetilmetacrilato em solvente monoclorobenzeno) em condutos forçados precisava de uma energia menor por unidade de vazão volumétrica que o solvente puro. Outros estudos posteriores confirmaram este fenômeno, conhecido na literatura científica como **EFEITO TOMS**.

Desde então, inúmeros trabalhos foram feitos tentando fazer uma generalização do mesmo. Foram feitas pesquisas em tubulações lisas (uma quantidade significativa) e em tubulações rugosas com diferentes valores de rugosidade e com diversas substâncias redutoras: polímeros solúveis e não solúveis, partículas finas e grãos de areia etc, em condutos circulares ou não. Estas pesquisas, não foram planejadas uniformemente de modo

que as medições da estrutura da turbulência e da Redução de Arrasto (R.A.) tiveram diferentes interpretações. Por um lado alguns grupos de investigadores só analisaram soluções poliméricas de um único polímero e para uma pequena faixa de números de Reynolds, trazendo na maioria dos casos interpretações baseadas num tipo de comportamento da turbulência. Poucos pesquisadores trabalharam com uma ampla faixa de valores do número de Reynolds e diferentes tipos de polímeros, obtendo conclusões mais gerais e abrangentes sobre as modificações no escoamento turbulento, destacando-se aqui o trabalho de **Tam et al (1992)**.

Embora demonstrado que a adição de polímeros provoca um efeito redutor de arrasto, este não é um processo aleatório quanto à sua ocorrência e alcance. Existem dependências bem definidas a respeito do tipo de substâncias, sua concentração, lugar de injeção do polímero e as próprias condições do escoamento:

concentração: de forma geral a redução de arrasto aumenta com o incremento da concentração, até atingir o valor da Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A), valor a partir do qual maiores concentrações não produzem mais efeito redutor. A concentração também varia com outros parâmetros, como por exemplo, o diâmetro da tubulação. Alta redução de arrasto, por exemplo, pode-se obter em tubulações de pequeno diâmetro com concentrações da ordem de 10 p.p.m de óxido de polyetileno com $M_w = 5.10^5$. Em tubulações de maior diâmetro, para obter o mesmo efeito é necessário uma concentração de 100 p.p.m da mesma solução. Em soluções de Guar Gum (G.G.) é típico concentrações na faixa de 1000 a 1500 p.p.m para efeitos razoáveis da redução de arrasto. No trabalho aqui apresentado, determinou-se para soluções de IQAPOL PA a relação entre a diminuição do fator de atrito, f , e a concentração, ou seja, a magnitude da redução de arrasto.

tipo de substâncias: Embora os polímeros e outras soluções macromoleculares, são os tipos mais importantes de substâncias redutoras de arrasto, a utilização de suspensões de

partículas finas ou fibras no escoamento portador, segundo alguns autores, também provocam este efeito. A redução varia desde muito forte até muito fraca.

condições do escoamento: para escoamento laminar esta comprovado que as soluções poliméricas obedecem a Lei de Poiseuille a qual define o comportamento de um solvente para valores do número de Reynolds menores que 2300 em tubulações lisas e rugosas. Na transição de escoamento laminar a turbulento, ambos (a solução polimérica e o solvente) tem o mesmo comportamento. No escoamento turbulento existe redução de f até um valor de concentração, a partir do qual, não há mais nenhum efeito na redução de f . Este limite é chamado Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A).

A bibliografia técnica registra uma grande quantidade de trabalhos e investigações desde a década dos anos 1950, quando foi registrado o efeito por **Toms (1949)** e por **Mysels (1949)**. Nestes anos apareceram os resultados dos trabalhos de doutoramento de **Shaver (1959)** e **Dodge (1959)**, onde se apresentaram coeficientes de atrito extraordinariamente baixos para soluções de polímeros. A partir destes resultados, pesquisadores da Marinha e da Indústria Petrolífera dos Estados Unidos perceberam o efeito deste fenômeno. **Ram et al (1967)** estudaram a Redução de Arrasto no transporte de petróleo cru a longa distância. **Petterson et al (1973)** analisaram a estrutura da turbulência em soluções poliméricas redutoras de arrasto, fazendo medições das intensidades longitudinais e radiais da turbulência por termoanemometria.

Independentemente das investigações feitas, ainda hoje o fenômeno não é totalmente compreendido. Uma série de aspectos químicos, mecânicos e hidrodinâmicos da R.A e a conseqüente perda de carga necessitam ser mais estudados. Existem razões para supor, que as partículas das substâncias redutoras de arrasto (moléculas compridas e flexíveis) interagem estreitamente com as partículas do solvente, mudando substancialmente o caráter da corrente turbulenta.

As mudanças indicadas manifestam-se na zona da camada limite, de espessura reduzida e que está próxima da parede que limita o escoamento. Perto da parede, diminuem as pulsações transversais, de velocidade e pressão e isto exerce uma decisiva influência no nível geral da turbulência e no comportamento de todo o escoamento.

Na prática verifica-se um crescente interesse pelo estudo do comportamento de soluções poliméricas, sob condições turbulentas. Tais estudos tem sido incentivados tendo em vista as conseqüências econômicas favoráveis em áreas de aplicação, tais como: transportes a grandes distâncias de petróleo cru e minérios, escoamento de esgotos, maquinária hidráulica, sistemas centrais de aquecimento, aplicações marinhas, agricultura, entre outras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Na bibliografia científica aparece uma grande quantidade de trabalhos que analisam o fenômeno da Redução de Arrasto (R.A.) por adição de substâncias como finos, areia, polímeros etc. Alguns destes trabalhos, tentam, além de demonstrar a existência do fenômeno, estudar o mecanismo que explique e justifique a redução de arrasto, aparecendo como principais teorias as de expansão molecular e a de modificação da estrutura da turbulência. Faremos uma breve revisão, a seguir, do estado da arte nesta área. Para estudos mais abrangentes, pode-se consultar Hoyt (apud Sellin et al 1982).

2.1. REDUÇÃO DE ARRASTO POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS.

Como dito na INTRODUÇÃO, os estudos de adição de polímeros com o intuito de diminuir a perda de carga e aumentar a capacidade de descarga devido ao efeito de diminuição do arrasto, tiveram seu início no ano 1948, quando Toms apresentou as primeiras evidências deste fenômeno.

A partir deste momento, abriu-se uma nova linha de pesquisa para tentar conhecer a física do fenômeno e seu possível equacionamento. Segundo a investigação bibliográfica feita os principais trabalhos são:

Virk, Merrill, Mickley e Smith (1967).

Eles analisaram a R.A. causada por diferentes soluções poliméricas, utilizando como polímero óxido de polietileno de peso molecular entre 8.10^4 e 6.10^6 e como solvente água destilada em escoamentos turbulentos em condutos forçados com diâmetros interiores igual a 0,292 cm e 3,21 cm. A concentração das soluções variou de 0,5 a 5000 ppm sendo que em todos os casos a viscosidade da solução polimérica era considerada igual à do solvente com uma temperatura média de $25 \pm 0,5$ °C. Os autores observaram que o início da R.A. ocorria

para um valor bem definido da tensão tangencial de parede a qual está relacionada ao diâmetro efetivo da molécula do polímero.

Os autores procuraram estabelecer a base de estudo do fenômeno da R.A. utilizando quatro diferentes conceituações:

- i) "effective slip" (Oldroyd 1948 apud Virk et al 1967).
- ii) lenta transição do regime laminar ao turbulento (Savins 1964 apud Virk et al 1967).
- iii) viscosidade anisotrópica (Shin 1963 apud Virk et al 1967).
- iv) visco elasticidade (Metzner & Park 1964, Hershey & Zakin 1965 apud Virk et al 1967).

Ao fazer as medições da estrutura da turbulência comprovaram que o escoamento médio segue o modelo de "effective slip". O "effective slip" é definido como o incremento do termo $\frac{1}{\sqrt{f}}$ para as soluções poliméricas em relação ao escoamento Newtoniano, para um mesmo valor de Re em uma determinada tubulação.

Concluíram que a lenta transição de regime laminar para turbulento não é uma explicação satisfatória pois este processo é rápido.

Como não conseguiram fazer medições na região de parede $0 < Y^+ < 50$, não puderam estabelecer conclusões à respeito da viscosidade anisotrópica e da viscoelasticidade.

Abordaram o conceito de arrasto máximo possível, limitado pela Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A.), que é independente do polímero e do diâmetro da tubulação.

Virk, P.S (1971).

Estudou o efeito da R.A. causado por soluções poliméricas de óxido de polietileno e poliácridamida de diferentes pesos moleculares, em tubulações lisas e rugosas. Mostrou que o início da R.A. ocorre para um mesmo valor de tensão tangencial de parede (confirmação de um outro trabalho do autor) tanto para condutos rugosos e lisos, sendo independente do valor da concentração do polímero, e variando inversamente com o quadrado do raio de

giração da molécula do polímero. Concluiu que não há nenhuma influência das condições do escoamento (hidraulicamente liso, de transição ou totalmente rugoso) durante o início da R.A.. O autor sugere que, para uma determinada velocidade de atrito uma forma apropriada de medir a Redução de Arrasto é o incremento ou o "deslocamento", relativo ao solvente, sendo este definido como:

$$S_r = \left[\sqrt{\left(\frac{f_s}{f_p} \right)} - 1 \right]_{Re_s \sqrt{f}} \quad (2.1)$$

Este incremento é o aumento na velocidade média da solução polimérica com respeito ao solvente para uma dada velocidade de atrito, tanto para tubulações rugosas quanto para lisas. Ao analisar a região de parede, definiu o regime liso efetivo ("effectively smooth regime") como aquele no qual, na faixa $e^+ < e^+ < e_s^+$, o comportamento da redução de arrasto em tubulações rugosas pode ser relacionado com a redução de arrasto em tubulações lisas, devido ao fato, já confirmado, que a tensão tangencial no início da R.A é igual para estes dois tipos de tubulações. Determinou que nesta região o deslocamento efetivo (S_r), obtido para tubulações rugosas a um determinado valor de velocidade de atrito foi o mesmo que o obtido para uma tubulação lisa sob idênticas condições, sendo que na faixa $e^+ > e_s^+$ o valor de S_r nas tubulações rugosas sempre foi menor que o das tubulações lisas. O valor superior obtido para o "effectively smooth regime" foi $e_s^+ = 50$.

Virk, P.S (1971-a),

Neste trabalho o autor faz uma abordagem das modificações que sofre o perfil de velocidades médias devido à adição de agentes redutores. Na análise dos resultados, utilizando um diagrama $U^+ \text{ vs } \log Y^+$, o autor define que, no caso geral da R.A., o perfil de

velocidades médias está dividido em três segmentos que são os seguintes, para distâncias medidas desde a parede ao eixo:

- i) a subcamada viscosa, de características semelhantes à subcamada viscosa para escoamento newtoniano,
- ii) uma zona interativa, característica de escoamentos redutores de arrasto,
- iii) o núcleo turbulento ou externo, com comprimento de mistura constante.

O autor estabeleceu que a zona interativa, chamada subcamada elástica, é uma característica particular dos escoamentos de soluções poliméricas, propondo então o chamado "modelo da subcamada elástica". Fez uma comparação deste modelo com outros três modelos:

- "effective slip" (Oldroyd 1948 apud Virk et al 1971-a).
- modelos da subcamada laminar, (Elata et al, de 1966 e Meyer de 1969 apud Virk et al 1971-a).
- modelo modificado de subcamada laminar (Seyer & Metzner de 1969 apud Virk et al 1971-a).

O autor conseguiu, a partir dos dados experimentais obtidos, definir a influência dos parâmetros poliméricos e do escoamento na determinação da espessura da subcamada viscosa, revelando com isso relações até então não conhecidas: num gráfico de coordenadas logarítmicas $\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \text{ vs } \log Re\sqrt{f} \right)$, as declividade do solvente e da solução polimérica são proporcionais, sendo que a constante de proporcionalidade é a mesma para diferentes espécies de polímeros e depende das características do polímero.

Hoyt, E. (1972).

Fez uma abrangente revisão do estado da arte (ao redor de 200 artigos) sobre a R.A. por polímeros até 1972. Abordou na sua revisão assuntos bastantes diversificados, indo desde a escolha dos tipos de polímeros que se prestam a essa finalidade, passando pelo

exame dos efeitos provocados por vários parâmetros (rugosidade, diâmetro, perfil de velocidades), tendo estudado ainda o escoamento por superfícies, a luz da teoria de redução do atrito e finalizando com a citação de várias aplicações.

No que se refere ao uso do tubo de Pitot para a avaliação da velocidade do escoamento com polímeros, Hoyt destaca que este instrumento tem limitações sugerindo que seu uso ficasse restrito às aplicações onde a calibração precisa, pudesse ser realizada exatamente sob as condições de uso. Diferentes aspectos como a relação entre o tipo de polímero e a sua concentração, dimensões da sonda e velocidade do fluido podem tornar extremamente complexa a tarefa de medição de velocidade utilizando o tubo de Pitot.

Lumley, J.L. (1973).

Mostrou que a R.A. poderia ser explicada pela diminuição da intensidade dos pequenos vórtices. No entanto, enfatiza que as tentativas de aplicação em novos projetos, tem muitas vezes levado a falhas devido ao comportamento imprevisível das soluções poliméricas. Afirma que este fenômeno pode ser atribuído também a mudanças na subcamada intermediária, que fica entre a subcamada viscosa e o núcleo turbulento.

Durst, F. & Rastogi, A.K. (1977).

Mostraram os resultados da previsão numérica para escoamentos turbulentos bidimensionais em canais e tubulações cilíndricas para soluções poliméricas e para solventes puros. Estas previsões foram feitas mediante um programa de computador para camada limite turbulenta e utilizando modelo $k-\epsilon$. O modelo, que leva em conta o efeito do número de Reynolds na vizinhança imediata da parede, é modificado para levar em conta o efeito da adição de polímeros em tubulações lisas e rugosas. Na aplicação deste modelo, os autores, obtiveram boa concordância com os resultados registrados na literatura. Foi possível a partir

do modelo teórico apresentado prever o efeito da degradação mecânica das moléculas do polímero.

Landahl, M.T. (1977).

Fez uma comparação da dinâmica do campo de velocidades na camada limite turbulenta sobre a base de uma análise simplificada das perturbações instáveis num escoamento paralelo. Mostrou a existência de três tipos de perturbações importantes:

- i) Propagação de perturbações de grande escala (representadas pela superposição de ondas tangenciais).
- ii) Perturbações convectivas, as quais decaem suavemente pela ação da viscosidade.
- iii) Perturbações de pequena escala, resultado das instabilidades secundárias das grandes escalas do movimento.

Neste trabalho Landahl criou um modelo para explicar o fenômeno da R.A., concluindo que com soluções de polímeros, as macromoléculas podem inibir estas instabilidades secundárias e reduzir a produção de tensões turbulentas devido ao grande incremento da viscosidade por expansão molecular produzidas por macromoléculas orientadas na direção principal do escoamento. A diminuição observada nos processos de rupturas e o amortecimento de estruturas de pequenas escalas podem ser previstas satisfatoriamente por este modelo. Estes resultados concordam com observações feitas usando técnicas de visualização de escoamento ou pela análise estatística dos dados experimentais. O modelo de Landahl parece explicar satisfatoriamente o fenômeno da R.A., mas está ainda muito longe de ser utilizado em aplicações práticas.

Scrivener, O. & Kopp Ch. (1977).

Fizeram um estudo das alterações na estrutura da turbulência devido à presença de PEO 301, usando duas técnicas experimentais: método fotográfico (para o estudo da região

de parede) e sistema de Laser Doppler Anemometry (L.D.A.) para o estudo do núcleo turbulento e da **buffer layer**. Acharam que para baixos valores de concentração (5 p.p.m) o perfil de velocidade média não é sensivelmente afetado. Mostraram ainda que a ação das macromoléculas foi observada na **buffer layer** onde existe efeito do número de Reynolds e das características do escoamento. Foram feitas medições da intensidade longitudinal, observando-se modificações na estrutura da turbulência. A partir dos dados obtidos foi feita a análise espectral das flutuações longitudinais mediante o cálculo das funções de densidade, das funções de autocorrelação e do espectro de potência, confirmando-se a idéia de uma transferência de energia das altas frequências às baixas frequências na estrutura da turbulência.

Lumley, J.L. (1977).

Descreveu qualitativamente a dinâmica básica da camada limite turbulenta para suspensões e para soluções poliméricas. Apesar das diferenças entre estas substâncias foi encontrado que alguns dos escoamentos analisados apresentam modificações na **buffer layer**, atribuindo-se a existência do fenômeno da R.A. a estas modificações, que são consequência da expansão molecular. Apresentaram evidências experimentais desta teoria.

Willmarth, W. & Bogar, T.J. (1977).

Fizeram uma avaliação dos últimos estudos apresentados para a análise da estrutura da turbulência perto das paredes. O trabalho destaca a importância do conhecimento da vorticidade na região de parede para a compreensão da turbulência, apresentando resultados das medições das tensões de Reynolds feitas com Anemômetro de Fio Quente, e mostrando as limitações que apresenta este instrumento, tendo em vista que sua escala de comprimento é muito maior que as menores escalas de comprimento do escoamento. Destacaram o conceito de parede como uma fonte de vorticidade sendo que, perto dela, onde a produção e

dissipação tem um máximo, a vorticidade tem um máximo também e é altamente intermitente. Analisaram a estrutura da turbulência mediante um modelo de Estrutura de Turbulência Intermitente.

Sellin, Hoyt, Pollert e Scrivener. (1982).

Nestes trabalhos (dois), eles apresentaram uma descrição da R.A. por aditivos, assim como uma rápida avaliação dos modelos propostos nos últimos anos, numa tentativa de compreender o mecanismo físico da R.A.. Analisaram o efeito das soluções poliméricas em meios porosos, embora estes não mostrem o fenômeno. Abordaram amplamente as aplicações, destacando exemplos onde aplicação de polímeros tem mostrado excelentes resultados econômicos. Fizeram uma exposição de aspectos muito importantes como: preparação da solução polimérica, métodos de injeção, o efeito econômico da utilização de polímeros, efeitos ecológicos e ambientais etc.

Da análise dos resultados experimentais, destacaram que o mecanismo da R.A. está localizado na região de parede e mais precisamente na **buffer layer**. Expuzeram que os polímeros tem um efeito sobre o balanço de energia, entre a produção e dissipação turbulenta, devido às propriedades elásticas das macromoléculas. Relacionaram a capacidade redutora de arrasto de um polímero qualquer com a sua capacidade de armazenar energia por esticamento.

Nos últimos seis (6) anos (1988-1994), houve um contínuo aumento da quantidade de trabalhos nesta área, confirmando os critérios expostos anteriormente sobre a utilização dos polímeros e outras substâncias como agentes redutores de arrasto em escoamentos turbulentos.

Tomita et al (1988).

Estudaram o fator de atrito para escoamentos turbulentos de soluções aquosas de Óxido de Polietileno (PEO), num canal bidimensional. A influência da viscosidade sobre a queda de pressão foi determinada pelo método de análise dimensional e o fator de atrito foi calculado mediante uma correlação dos números de Reynolds e de Weissenberg. Neste trabalho a distribuição de velocidade foi determinada usando um tubo de Pitot. Demonstraram que a camada de transição das soluções tem uma maior espessura quando comparadas com o escoamento Newtoniano.

Usui et al (1988).

Apresentaram um trabalho onde se analisou a estrutura da turbulência em soluções redutoras de arrasto numa tubulação (mediante injeção da solução) e realizando as medições com um Laser-Doppler Velocimeter (LDV). O agente redutor utilizado foi o Óxido de Polietileno (PEO). Este foi injetado na tubulação através de um pequeno tubo colocado no centro da tubulação. Os resultados experimentais foram comparados com medições feitas em escoamentos turbulentos de soluções homogêneas a uma concentração de 300 p.p.m. Os resultados sugerem que no caso de polímeros injetados, estes causaram um incremento na espessura da **Buffer Layer**, um aumento na viscosidade turbulenta e a supressão dos menores turbilhões. Fazendo uma análise da escala da turbulência e do fator de atrito foi possível observar a diferença no comportamento das soluções injetadas e homogêneas.

Lodes et al (1989).

Fizeram experiências sobre a influência do Polivinilacetato em água, estudando o efeito da concentração de polímeros sobre a R.A., em tubulações de 2,4 cm de diâmetro interior. As velocidades locais instantâneas foram medidas com o Laser-Doppler Velocimeter Disa Mark II. As concentrações de testes estavam na faixa de 10 a 2000 p.p.m. Eles determinaram que o coeficiente de R.A. é proporcional à concentração e ao grau de

hidrólise do polímero usado. Nestes ensaios não foi observada a degradação mecânica da solução.

Hattori et al (1989).

Estudaram a R.A. em escoamentos turbulentos de uma solução polimérica que escoava numa tubulação cilíndrica a qual foi coberta na superfície interior com fibras. Eles basearam este trabalho no fato comprovado por outros pesquisadores que a mistura de polímeros e fibras produzem maior efeito R.A. que as soluções poliméricas sózinhas. Eles encontraram que os dois efeitos em estudos são similares e ao fazer a comparação da redução de arrasto entre esta tubulação "rugosa" e uma lisa, acharam que a primeira apresenta um maior efeito para altos valores de Reynolds.

Stupin, A.B. (1991).

Fez uma análise sobre a teoria (semiempírica) da redução de arrasto tendo empregado o método da abordagem estrutural para a sua obtenção. Esta teoria é capaz de prever corretamente a distribuição de velocidades e o coeficiente hidráulico de redução em escoamentos turbulentos de soluções poliméricas, incluindo o máximo potencial de R.A. Os resultados obtidos por esta teoria apresentaram boa concordância com os resultados experimentais.

Little et al (1991).

Apresentaram um trabalho onde examinaram a influência do tamanho da partícula dos polímeros na redução de arrasto. Eles utilizaram soluções e suspensões em pó (slurry) de Óxido de Polietilene (PEO), as quais foram injetadas num escoamento turbulento de água numa tubulação, com o objetivo de determinar as diferenças nas magnitudes da R.A. entre estas duas formas de mistura água-polímeros. As medições para a análise foram feitas

mediante a determinação da queda de pressão diferencial ao longo do comprimento da tubulação. Os resultados das suspensões de pó com partículas de diferentes tamanhos foram comparadas com os da solução. Verificaram que, para um determinado tamanho de partículas, podiam-se obter reduções no fator de atrito (e na redução de arrasto) da ordem de 17-19 % quando comparadas com as soluções poliméricas para condições de escoamento similares.

Juban et al (1992).

Análisaram a influência na R.A. das características da tubulação. Eles fizeram as suas experiências em tubos termoplásticos, usando uma solução de aditivos fresca, achando que a magnitude da R.A. depende muito do diâmetro da tubulação, do número de Reynolds e da concentração. Na relação diâmetro-R.A. conseguiram determinar que para menores valores do diâmetro, maiores são os valores da R.A. Para estas tubulações a R.A. máxima obtida foi da ordem de 29,4 %.

Tam, K.C. et al (1992).

Fizeram experiências com quatro polímeros (poliacrilamida -separan AP30 e AP 302-, óxido de polietileno e xanthan gum), confirmando que soluções de polímeros diluídos de alto peso molecular provocam a R.A. Os testes foram realizados em uma tubulação de vidro, com seção de teste de diâmetro interior de 9 mm e comprimento de 3,0 m. A vazão foi de aproximadamente $8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$ (velocidades entre 1,5 e 2,0 m/s e números de Reynolds entre 10^4 e $1,5 \cdot 10^4$).

Utilizando o modelo de comprimento de mistura de Prandtl, desenvolveram uma correlação geral para previsão de perfis de velocidades de soluções poliméricas que só dependem do fator de atrito, f . Estes resultados são válidos para uma faixa de Reynolds entre 10 000 e 11 000 e concentrações de 20 p.p.m até 200 p.p.m. A correlação obtida é

independente do tipo de polímero, da concentração, da degradação mecânica e do número de Reynolds, sendo dada por:

$$U_p^+ + \frac{2,43}{\alpha} \ln Y^+ = \left(\frac{6,5 - \beta}{\alpha} + \Gamma \right) \quad (2.2)$$

estabelecendo que os parâmetros α , β e Γ só são função do termo ε , eq. (6.16), e independentes do número de Reynolds, da concentração e do tipo de polímero.

A partir dos resultados obtidos fizeram uma análise da influência de diferentes aspectos sobre a redução de arrasto tais como:

- efeito da concentração: as soluções de poliacrilamidas apresentam uma variação mais brusca do perfil newtoniano quando se aumenta a concentração. Para as outras soluções o perfil de velocidade apresenta as mesmas declividades que o escoamento newtoniano.
- efeito do tipo de polímero: é apresentado o perfil de velocidades a 50 ppm das quatro substâncias utilizadas, tendo estas um comportamento marcadamente diferentes. Mostra-se uma forte dependência entre a R.A e o peso molecular do polímero.
- efeito da degradação mecânica: este efeito é estudado pela existência de uma bomba centrífuga na instalação. Não há dúvida que a degradação da solução polimérica é mais rápida sob as condições de intenso cisalhamento que ocorre no interior de uma bomba. As soluções de óxido de polietileno apresentaram degradação nas instalações onde existem este tipo de máquina hidráulica e contrariamente apresentam excelentes efeitos redutores do arrasto onde não existem.
- efeito do número de Reynolds: existe uma alta dependência no grau de redução de arrasto com o número de Reynolds. A 50 ppm, a solução de separan AP30 apresenta nível maior de R.A. para Reynolds igual a 11000, quando comparada com a condição para Reynolds de 6000, por exemplo.

No trabalho obtiveram bons resultados levando em conta os dados experimentais.

Mashkov, (1992).

Propôs uma expressão para o comprimento de mistura sobre uma superfície permeável com injeção de polímeros. Esta expressão relaciona, o comprimento de mistura e o efeito de injeção no cálculo das camadas limites. Neste trabalho, o autor mostrou uma solução numérica comparando-a com dados obtidos experimentalmente, sendo que existe uma boa concordância entre eles.

McAndrew, et al (1993).

Estabeleceu-se neste trabalho que para a polivinilamina (PVAm, de peso molecular igual a $8 \cdot 10^6$) atuando como agente redutor de arrasto, a resistência à degradação mecânica é maior que para qualquer outro dos polímeros avaliados (PEO, PAM em soluções de água e água de mar). Os níveis da redução de arrasto, comparados com os polímeros antes mencionados, são muito menores. Expôs-se ainda neste trabalho, que devido à estabilidade das soluções de polivinilamina, são possíveis as aplicações comerciais delas.

Gu et al (1993).

Desenvolveram um trabalho onde determinaram as características redutoras de arrasto de uma solução viscoelástica de poliacrilamida em tubulações de 4,6 mm e 5,96 mm de diâmetro interior e uma faixa de números de Reynolds entre 5000 e 110000. Aqui eles investigaram a dependência dos parâmetros poliméricos (concentração, tipo de polímeros etc) em função do diâmetro interior, do número de Reynolds e da temperatura da solução polimérica. Neste trabalho foi estudada a estabilidade de diferentes poliacrilamidas, assim como o mecanismo da redução de arrasto.

Juban, Bassam e Mansour (1993).

Analisaram a R.A. causada pela adição de um aditivo químico num canal retangular aberto. Para esta configuração determinaram que a R.A. começa quando a tensão tangencial excede o valor de $2,16 \text{ N/m}^2$ e se incrementa ao aumentar o número de Reynolds e a concentração. Embora isto aconteça eles determinaram que para números de Reynolds muito grandes a intensidade de R.A. diminuía, fundamentalmente pela mudança nas propriedades da solução devido à degradação mecânica. Observaram que a concentração ótima neste caso esta na ordem de 70 - 80 p.p.m. e que o incremento na vazão é de 27,5 %.

Chanson et al (1994).

Mostraram que em escoamentos hidráulicos, devido à interação partícula-turbulência, pode-se induzir redução de arrasto, como é observado com soluções poliméricas e escoamentos auto-aerados. No trabalho eles fizeram uma reavaliação da R.A. em diferentes situações (escoamentos com sedimentos em suspensões, escoamentos água-carvão, soluções poliméricas etc) onde conseguem desenvolver analogias entre estes escoamentos. Sugeriram que a presença de partículas perto do fundo incrementa a viscosidade efetiva da mistura e a espessura da subcamada. Este resultado fornece uma melhor análise do escoamento água-partículas e uma maior precisão na previsão da redução de arrasto.

Embora tenhamos procurado abordar, neste capítulo os resultados mais importantes relativo a área da redução de arrasto por adição de polímeros (principalmente em condutos forçados), a bibliografia recolhe hoje, uma grande quantidade de trabalhos que analisam o fenômeno em áreas bastante diversas como por exemplo: meios porosos, redução de potência de bombeamento, biotecnologia e bioengenharia, transporte hidráulico de sólidos etc.

Nos últimos anos tem-se desenvolvido trabalhos que analisam a R.A., não pelo efeito da adição de agentes redutores, senão pela utilização de superfícies (compliant, surfactant e riblet surfaces) redutoras de arrasto. Esta análise, todavia, foge ao escopo deste trabalho.

3. O FENÔMENO DA REDUÇÃO DE ARRASTO.

3.1. INTRODUÇÃO.

A essência da definição de redução de arrasto por adição de polímeros pode ser explicada da seguinte forma: Em certas condições de um escoamento turbulento as soluções soluto-solvente precisam de uma menor energia que o solvente puro. Assim para elas é necessário um gradiente de pressão menor para manter a mesma vazão ou poder-se-ia obter uma maior vazão com o mesmo gradiente de pressão.

Hoje é reconhecido que a redução de arrasto é um fenômeno que ocorre numa região perto da parede sendo difíceis as medições na área de interesse. Por exemplo a geometria de alguns sensores dos anemômetros (de ponta ou filme quentes) não permite fazer medições na camada limite. Isto é uma das causas pela qual a R.A. ainda continua sendo um fenômeno que carece de explicação física, química e dinâmica, e apesar dos avanços mencionados, não há ainda uma descrição satisfatória das inúmeras variáveis que exercem influência neste fenômeno.

Dependendo da análise (mecânica ou química) a abordagem para a explicação pode ser feita respectivamente em termos da dinâmica dos fluidos (meios contínuos), ou da influência das moléculas dos polímeros no solvente.

Em termos da abordagem molecular, uma explicação para o mecanismo da R.A. é dada através da expansão molecular do polímero. Esta análise é feita em termos do que "presumivelmente acontece" sem que exista uma comprovação real disto.

Em soluções, as moléculas existem como bolas enroladas envolvidas no solvente, sendo que a agitação térmica é responsável pela conservação de sua forma, parcialmente contraída, devido à ação dos "choques" moleculares e proporciona uma força elástica que é capaz de restaurar o diâmetro de equilíbrio da molécula.

Quando a molécula é submetida a um esforço longitudinal adquire uma forma elipsoidal; quando a taxa de deformação excede a força restauradora, a molécula se expande tanto quanto ela pode até uma nova posição de equilíbrio, onde pode ficar totalmente estendida. Se a isto é adicionado um campo de esforços, onde a molécula ficaria rodando devido à ação deles, então é necessária uma taxa de deformação muito grande para produzir a mesma expansão já que as moléculas permanecem alinhadas com o eixo principal dos esforços durante um período de tempo muito pequeno. Se a taxa de rotação é grande, a expansão da molécula é limitada independentemente da magnitude da taxa de deformação.

O processo acima descrito é muito complicado já que há evidências que a interação das moléculas é um aspecto importante na dinâmica do processo da redução de arrasto, além do fato, que qualquer amostra de um polímero apresenta uma ampla variedade de peso molecular e portanto de forças efetivas de restituição (a qual inclusive muda com a expansão da molécula) e de tempos de relaxação.

No núcleo turbulento de um escoamento sujeito a altos números de Reynolds a vorticidade e a taxa de deformação não estão correlacionadas uma com outra podendo, portanto, ocorrer virtualmente qualquer combinação entre elas. Ambas apresentam uma distribuição de probabilidade para os extremos ("long tails"), não ocorrendo portanto uma distribuição Gaussiana. Deste modo há a possibilidade de se encontrar regiões em que ocorrem altas taxas de tensões com baixa vorticidade. Nesta condição, como analisado anteriormente, a molécula pode-se expandir quando o valor da taxa de tensões é suficientemente grande. Para números de Reynolds pequenos, ou seja, para regiões perto da parede ocorrem zonas de alta taxa de deformação e baixa vorticidade.

Na subcamada viscosa, os valores de taxa de deformação são iguais à vorticidade, portanto não é de se esperar que ocorra expansão molecular significativa nesta zona. Quando a molécula do polímero se expande, a viscosidade da solução se incrementa. Essencialmente este incremento depende da diferença de velocidades ao redor da molécula

(maior diferença de velocidade significa maior expansão). Como o diâmetro médio da molécula pode-se expandir por um fator do número de subunidades moleculares da ordem de 10^5 , o incremento na viscosidade pode ser significativamente alto sendo que existe incrementos da viscosidade no núcleo turbulento do fluido, mais não na subcamada viscosa. Este efeito provoca a supressão da vorticidade e consequentemente das tensões de Reynolds na camada intermediária, provocando um aumento da espessura desta subcamada e portanto a redução de arrasto.

Uma outra abordagem pode ser estabelecida através da interação polímero-turbulência, sendo um aspecto importante a relação (fundamental) entre as escalas das macromoléculas e as escalas de turbulência. A importância desta relação foi reconhecida nos últimos tempos apesar do fato que, em soluções diluídas, as propriedades viscoelásticas convencionais desta solução não estão bem definidas. Muitos autores estudaram a relação entre a redução de arrasto e o tempo de relaxação molecular característico, mas com sucesso limitado. Melhores resultados foram obtidos por Virk (1967), que demonstrou que o início da R.A. ocorre para uma tensão de cisalhamento de parede crítica, que está relacionada às dimensões das moléculas dos polímeros, normalmente definida pelo raio de giração (L_m). Isto sugere que o início da redução de arrasto depende só da escala de comprimento, embora a maioria dos resultados experimentais não mostram uma clara relação entre as escalas de comprimento das moléculas do polímero e as características do escoamento turbulento.

Daqui é provável que uma explicação mais clara possa ser obtida através da relação das escalas de tempo molecular e o tempo característico do escoamento turbulento. Fabula (1971) foi o primeiro a apresentar um critério de início de arrasto baseado na interação entre a escala de tempo do escoamento e o tempo de relaxação molecular. Esta hipótese de escala de tempo foi confirmada por Berman (1978), que mostrou que as curvas de início e de redução de arrasto estão relacionadas ao tempo de relaxação molecular.

Nestas análises as escala de tempo são determinadas pelas equações:

$$T_w = \frac{\mu}{\tau_w^*} \quad (3.1)$$

$$T_m = \frac{\mu[\eta]M_w}{RT} \quad (3.2)$$

As escalas de comprimento utilizadas são:

$$L_w = \frac{v}{u_*} \quad (3.3)$$

$$L_m = 1,42 \cdot 10^{-12} M_w^{-0,57} \quad (3.4)$$

Mais recentemente muitos autores tem demonstrado a importância da elasticidade da macromolécula na explicação da redução de arrasto por polímeros, já que esta relaciona a produção e a dissipação turbulenta. A capacidade redutora de arrasto de um polímero está fortemente relacionada com as propriedades elásticas das suas moléculas e assim com a sua capacidade de armazenar energia por esticamento.

Experimentos feitos com polyelectrolites de diferentes rigidez, mostraram que o nível da redução de arrasto é controlada pela capacidade de esticamento da molécula.

3.2. O INÍCIO DA REDUÇÃO DE ARRASTO.

O fenômeno de início da R.A. é um dos mecanismos mais estudados até hoje. Fisicamente isto implica em uma interação incipiente polímero-solvente. Quando começa a redução de arrasto? De que depende? Será que depende do efeito da deformação da

molécula do polímero ou da modificação da estrutura do escoamento turbulento ? Estas e muitas outras perguntas tem motivado inúmeros trabalhos de pesquisa.

Como primeiro critério, alguns autores destacam que o início é brusco e sugerem que deve existir uma condição necessária, explicitamente ligada à macromolécula, que causa este efeito num escoamento turbulento. Esta hipótese tenta achar uma relação entre o diâmetro da macromolécula e a escala de dissipação turbulenta. Ela expressa que o diâmetro efetivo de uma molécula em soluções diluídas (D_m), é aproximadamente duas vezes a raiz média quadrática (R.M.S) do raio de giração, L_m , e independentemente da concentração. Desta forma,

$$D_m = 2L_m \quad (3.5)$$

Um segundo critério é a possível influência da subcamada viscosa. Alguns trabalhos que abordam este aspecto não estabelecem nenhuma relação entre eles. Resultados experimentais tem demonstrado que a relação entre o começo do fenômeno em estudo e a subcamada viscosa independe do tipo de regime (escoamento hidráulicamente liso ou escoamento totalmente rugoso). É determinado que a interação polímero-solvente começa a um valor aproximado de $e^+ > 5$. Na faixa $5 < e^+ < 50$, ou seja, na zona de transição é onde se inicia o processo responsável pela redução de arrasto.

O terceiro critério estabelece a ocorrência do início da redução de arrasto para um valor de tensão tangencial de parede, τ_w , essencialmente igual para as tubulações rugosas e lisas, sendo este valor independente da concentração do polímero, da rugosidade relativa da tubulação e do regime de escoamento. Virk et al (1967) mostraram que τ_w está relacionada com o raio de giração do polímero na solução polimérica. Para uma série homóloga de polímeros num solvente dado, a relação semiempírica tem a forma:

$$\tau_w \propto L_m \quad (3.6)$$

sendo a constante de proporcionalidade (α) uma característica do sistema polímero-solvente.

3.3. MODELOS DE PREVISÃO DA REDUÇÃO DE ARRASTO.

Como dito anteriormente, na intenção de explicar o fenômeno da R.A. muitos pesquisadores abordaram este aspecto através da criação de modelos físicos ou matemáticos tentando obter uma equação, sistema de equações ou gráficos que de forma rápida, fácil e precisa permitessem prever a ocorrência deste fenômeno e a sua magnitude.

De forma geral pode-se dizer que os primeiros modelos foram feitos por especialistas em reologia. Estas primeiras tentativas não tiveram comprovação experimental nenhuma e abordavam aspectos relacionados com o chamado **efeito de parede**, tais como a existência de uma camada redutora de cisalhamento próxima à parede ou a possibilidade de um escorregamento junto a ela.

Uma classificação geral dos diferentes modelos desenvolvidos para prever o fenômeno de R.A. está apresentada a seguir:

3.3.1. Modelos de previsão baseados nas alterações da perda de carga do escoamento turbulento (modelos de energia).

Estes modelos levam em conta a energia armazenada em macromoléculas esticadas que sofreram um processo de expansão. A capacidade de armazenamento de energia do polímero pela alteração de sua conformação molecular e a do solvente a ele associado, diminuem a intensidade das microperturbações que são dissipadas pela ação viscosa do

solvente. Desta forma, ao inibir a formação de pequenos vórtices, as moléculas do polímero alteram a estrutura da turbulência e, conseqüentemente, reduzem o arrasto.

Dentre os modelos que tiveram um certo grau de sucesso podem-se destacar os de Walsh e Kohn. Walsh (1967) foi o primeiro a desenvolver uma teoria qualitativa para o mecanismo da R.A. que leva em conta a energia armazenada na molécula esticada. Ele propôs que as perturbações de pequena escala perto da parede tendem a aumentar porque elas extraem energia localmente para o escoamento mais rapidamente do que podem dissipá-la. Resultados experimentais comprovam este modelo, no qual mostra-se uma queda na dissipação de energia turbulenta perto da parede e um incremento na microescala de Taylor. Kolh (1973) também propôs um modelo que leva em conta a quantidade de energia armazenada mas foi mal sucedido pela dificuldade de quantificá-la. Hoje ainda não fica claro o mecanismo de restituição da energia armazenada ao escoamento.

3.3.2. Modelos de previsão baseados no comprimento das moléculas do polímero (escala de comprimento).

A partir da escala de comprimento das moléculas do polímero, modelos de duas, três e quatro camadas tem sido propostos por diferentes autores. Virk (1967) propôs um modelo denominado "Modelo da Subcamada Elástica" no qual aparece a Assíntota de Máxima Redução de Arrasto no diagrama do fator de perda de carga, f . As três camadas no perfil de velocidades, segundo Virk são: a subcamada viscosa, a subcamada elástica intermediária e a região externa (núcleo turbulento).

O autor destaca, a partir dos resultados, a existência, num escoamento de soluções poliméricas, de cinco regimes muito bem definidos:

- **Regime Laminar:** Neste regime, tanto a solução polimérica quanto o solvente seguem a mesma lei (Lei de Poiseuille) para tubulações lisas e rugosas. O coeficiente de perda de carga é definido como:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.7)$$

- **Regime de transição do escoamento laminar para turbulento:** Aqui o solvente e a solução polimérica tem o mesmo comportamento em tubulações lisas e rugosas.

-**Regime turbulento sem Redução de Arrasto:** As soluções poliméricas obedecem a mesma relação para o fator de perda f que o solvente, com $f = f(Re)$, sendo válida a equação para regime turbulento hidraulicamente liso:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log Re \sqrt{f} - 0,8 \quad (3.8)$$

- **Regime turbulento com redução de arrasto. Regime polimérico.** Aqui o comportamento da solução polimérica depende de propriedades tais como concentração, peso molecular e solvatação (associação molecular do soluto e do solvente), obedecendo à seguinte equação:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{-1/2} = (4,0 + \delta) \log\left(\frac{f}{4}\right)^{1/2} - (0,4\delta) \log \sqrt{2} DW \quad (3.9)$$

- **Regime turbulento com redução de arrasto, independente dos parâmetros poliméricos, A.M.R.A.** Tanto para tubulações lisas quanto para rugosas o fenômeno em estudo é limitado por um valor que é independente dos parâmetros poliméricos, ou seja, as alterações dos parâmetros das soluções poliméricas não conseguem mais melhorar o desempenho da R.A., valendo a equação:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{-1/2} = 19,0 \log \operatorname{Re} \left(\frac{f}{4}\right)^{1/2} - 32,4 \quad (3.10)$$

Dentre os modelos de previsão baseados no comprimento das moléculas do polímero, destaca-se ainda o modelo de Berman (1977), no qual existe uma dependência na relação do fator de perda de carga como uma função do nível da R.A. Para baixos valores de R.A. (< 30 %) esta relação leva em conta o tempo de relaxação da molécula, a velocidade de atrito e o incremento na declividade na curva de f. Para altos valores (> 30 %) esta relação é uma função só, da velocidade de atrito.

3.3.3. Modelos de previsão baseados no tempo de relaxação do polímero (escala de tempo).

Estas teorias surgiram no final da década de 1960 e estabelecem que o início da R.A. deverá ocorrer quando a relação do tempo de relaxação (ou da redução da tensão de início de arrasto) e da escala de tempo do escoamento turbulento for igual a 1, ou seja:

$$\theta\tau^* = \frac{(M_w \eta_s [\eta])}{2,367RT} = 1,0 \quad (3.11)$$

3.3.4. Modelos de previsão baseados na multiplicidade dos mecanismos da R.A. Estes modelos foram criados partindo do princípio que a natureza do fenômeno é extremamente complexa. O modelo mais completo, segundo os resultados obtidos, foi proposto pelo Prof. Berman (apud Domingos, S 1994), cujo modelo (qualitativo) apresenta três mecanismos diferentes:

- mecanismo de aumento da viscosidade no núcleo turbulento por expansão molecular.
- supressão das turbulências de pequenas escalas.
- modificação dos macrovórtices.

Ele observou que a supressão da turbulência ocorre ao mesmo tempo pelos três mecanismos, sendo muito difícil quantificar o efeito separado de cada um deles.

4. POLÍMEROS.

Com o intuito de fazer uma breve abordagem das características gerais dos polímeros redutores de arrasto e particularmente da poliacrilamida IQAPOL PA, utilizado neste trabalho, apresenta-se a seguir alguns aspectos importantes, para uma visão mais ampla deste fenômeno.

O termo "polímero" vem do grego "muitas partes". Esta definição, todavia, não é muito precisa pois não define o menor comprimento da molécula, sendo então possível chamar polímero a qualquer molécula com alguns meros. Os polímeros com baixo peso molecular são chamados oligômeros (poucas partes) e os de alto peso molecular, altos polímeros.

Um polímero é uma grande molécula formada a partir da repetição de unidades estruturais moleculares denominadas monômeros. Uma grande quantidade dessas pequenas moléculas (monômeros) é combinada quimicamente numa grande molécula (polímero) em arranjos lineares ou ramificados.

Além de suas características físico-químicas, duas outras características determinam a utilização de um polímero em sistemas aquosos:

- Composição química, ou seja, a estrutura química dos monômeros para a polimerização e a configuração das unidades de monômeros na molécula terminada do polímero.
- Tamanho molecular e distribuição, ou seja, o grau de polimerização, grau de ramificação ou linearidade, extensão de cadeias cruzadas etc.

No que se refere à composição química, esta pode ser melhor entendida pela explanação dos processos de polimerização. As famílias de polímeros podem ser de condensação ou de adição.

Os polímeros de condensação, também chamados "policondensados" são aqueles cuja composição química da unidade repetida não apresenta alguns átomos presentes na estrutura do monômero (ou monômeros) iniciais. São normalmente de baixo peso molecular, podendo

ser ramificados ou lineares. Estes tipos de polímeros sempre resultam na formação de pequenas moléculas estáveis com subprodutos como: água, metanol, amônia etc.

Sendo assim, a polimerização por condensação resulta da formação de ligações químicas estáveis como as amidas, ester, amins etc entre pequenas moléculas. Esses grupos funcionais e outros presentes na molécula são responsáveis pela característica química do polímero.

Alguns exemplos de polímeros de condensação são: os poliésteres, Df resinas, Kymene 557, assim como os naturais: celulose, amido e proteínas.

Os polímeros de adição também chamados "poliadicionados" são aqueles nos quais as unidade repetidas da macromolécula tem a mesma composição química, ou seja, a mesma fórmula global que a do monômero, apresentando peso molecular alto (da ordem de milhões).

O processo fundamental na polimerização por adição é o rápido crescimento da cadeia através de estágios intermediários, muito reativos. Um iniciador químico é utilizado para a partida desse processo. Os polímeros de adição mais utilizados são: cloreto de vinila, ácido acrílico, etil acrílico, estireno, butadieno, crilonitrila etc.

A diferença fundamental entre "policondensados" e "poliadicionados" está na natureza dos processos de síntese. No primeiro caso predominam as reações que procedem por passos discretos; no segundo caso as reações em cadeia são promovidas por reações intermediárias muito ativas.

Quando ocorre a mistura de dois ou mais monômeros diferentes numa mesma polimerização o produto resultante será um Copolímero.

A outra característica de diferenciação está no tamanho e no arranjo das moléculas. Esta característica é o que geralmente se denomina de Peso Molecular. Embora o peso

molecular seja precisamente definido como quantidade de massa, muitos métodos físicos usados para determiná-los medem somente o tamanho molecular.

Na verdade um polímero é uma coleção de moléculas possuindo uma variedade de pesos moleculares. Desta forma o peso molecular é tão somente um valor médio que depende do método de determinação e da interpretação dos registros originais. Por exemplo a poliacrilamida, de peso molecular $7,1 \cdot 10^6$, pode contar com um número significativo de moléculas individuais com peso molecular nas faixas de 1 a 2 milhões e de 10 a 12 milhões.

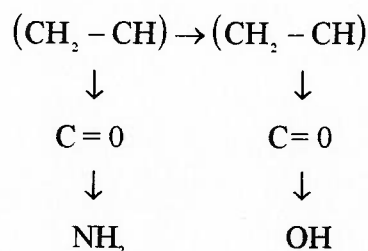
Os polímeros redutores de arrasto devem cumprir com as seguintes condições:

- Peso molecular maior que $5 \cdot 10^5$.
- Polímero linear.
- Polímero solúvel em água.

4.1. IQAPOL PA.

É um polímero aniônico de alto peso molecular, destinado à clarificação de líquidos turvos inclusive água potável de acordo com a U.S FOOD AND DRUG ADMINISTRATION, CRF TÍTULO 21, SEÇÃO 121:1092.

Pode ser classificado como um copolímero aniônico (ácido acrílico-acrilamida) com a seguinte estrutura molecular:



As características do produto são:

Aparência	sólido granulado branco,
Densidade	800 ± 50 g/l,

pH, 20°C, solução 1 %	7,8 ± 0,2 %,
Toxidez	Baixa,
Peso Molecular	17.10 ⁶ (alto).

4.1.1. PREPARO DA SOLUÇÃO POLIMÉRICA.

IQAPOL PA deve ser preparado como solução para estoque a uma concentração máxima não superior a 0,25 % (250 g por 100 l de água).

A estabilidade da estocagem é a seguinte:

IQAPOL PA sólido	mais de 12 meses,
solução a 0,25%	2 a 3 dias,
solução a 0,05 %	1 dia.

A adição de IQAPOL PA a água de preparação mãe, deve ser lenta e gradual incidindo direto ao vortex formado pela agitação, a fim de evitar grumo e má dissolução do produto. A agitação máxima permissível não deve ultrapassar 450 rpm de modo a evitar a quebra das cadeias poliméricas e a queda da eficiência do produto.

Nos ensaios teve-se o cuidado de manter o volume da água constante, ou seja, fixou-se uma condição de contorno inicial equivalente a 1000,7 ± 12 l de solvente, para todos os ensaios. Este resultado é a soma do volume da água no reservatório, no nível mínimo (758,7 ± 11,25 l) e o volume da água na tubulação (242 ± 0,75 l).

A concentração da solução polimérica pode-se calcular pela relação:

$$C_w = \frac{\text{Massa de soluto}}{\text{Massa de solvente}} \quad (4.1)$$

Segundo as concentrações de trabalho, as quantidades de polímeros utilizadas nos ensaios foram:

Cw (p.p.m.)	Massa (gramas)
5	5,00
10	10,00
20	20,00
50	50,00
70	70,00
110	110,00

Depois do preparo da solução mãe esperou-se entre três e quatro horas para realizar os ensaios. Dividia-se o volume desta solução, em 10 partes iguais e uma vez ligada a bomba da instalação jogava-se cada uma destas partes no reservatório, separadas por um tempo adequado, para obter uma mistura homogênea. Ao finalizar este procedimento estava-se em condições de começar os ensaios.

Do ponto de vista prático, o preparo da solução polimérica foi muito difícil, devido fundamentalmente ao fato, de não se dispor de instrumentação específica para isto. Para maiores valores de concentração o tempo utilizado foi excessivamente grande (mais de 6 horas) em condições totalmente precárias. Apesar disto foi possível garantir uma solução perfeitamente preparada. A solução mãe foi preparada a 1-2 % deixando cair aos poucos o polímero e agitando-a manualmente. Depois dividiu-se em partes esta solução jogando-a no reservatório e esperando um tempo adequado (30 minutos), a partir do qual considerou-se que a mescla estava totalmente homogeneizada.

Para o último ensaio efetuado, 110 ppm, utilizou-se o polímero em forma de barra, o que obrigou a mudanças no método de preparo da solução. O polímero nesta forma tem a facilidade de se dissolver pela ação da água que circula por cima dela. É importante destacar que o fluido tem que se mover para que aconteça a dissolução.

Na tubulação de recalque da bancada foi colocada uma peneira, a qual permitia a passagem da água, deixando-se a barra de polímero sobre a peneira. Ligou-se a bomba e esperou-se que a barra de polímero se dissolvesse por completo. Este método oferece a vantagem que junto à dissolução ocorre a homogeneização.

É importante frisar que a composição química desta solução não afeta o revestimento de borracha natural do rotor da bomba, nem por erosão nem por reação química. Além disso, durante a restituição da solução polimérica à rede comum, não deve acontecer nenhum problema referido à contaminação do meio ambiente. Deve-se lembrar que este polímero é utilizado para a clarificação de líquidos turvos inclusive de água potável, sendo utilizado em estações de tratamento.

O IQAPOL PA é muito usado hoje nas indústrias de minérios e de petróleo, assim como nas estações de tratamento de esgoto e de água. As principais aplicações são:

- Clarificação de água.
- Pushing. Método usado na extração de petróleo.
- Perfuração. Como elemento auxiliar na lubrificação da broca e na penetração desta no terreno.

5. BANCADA EXPERIMENTAL.

A bancada experimental a ser utilizada neste trabalho é a mesma usada por Nakae (1994).

5.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.

O esquema geral da instalação aparece na Fig (5.1).

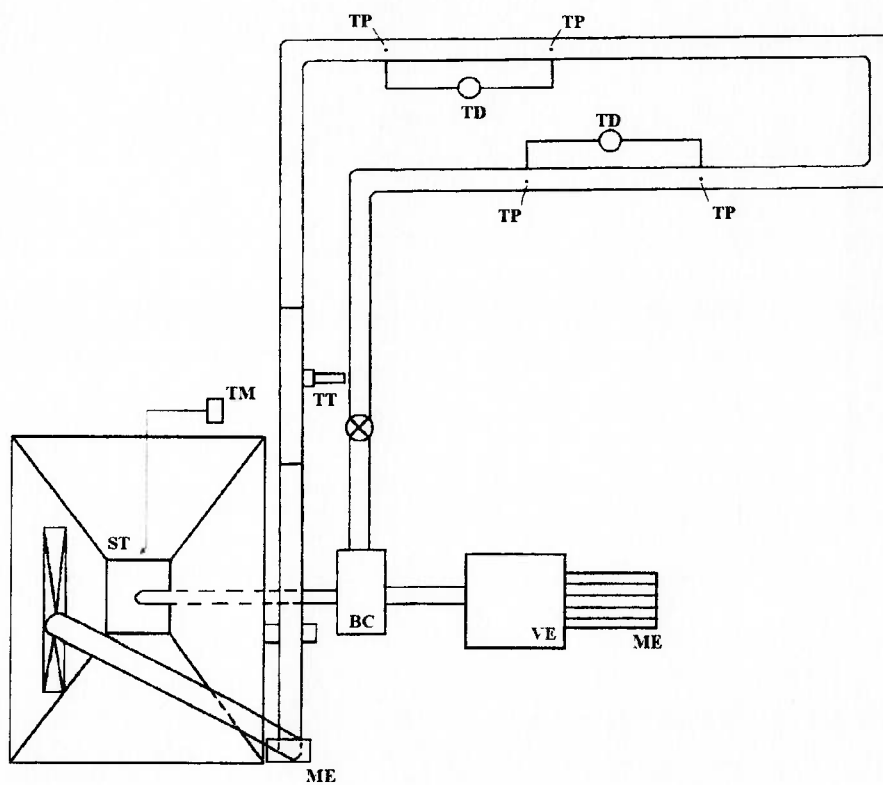


Fig (5.1). Esquema da bancada experimental.

No anexo III, é apresentado um conjunto de fotos de elementos básicos da bancada experimental: Medidor Eletromagnético de Vazão, Tubo de Pitot, Transdutores de pressão etc.

Os principais equipamentos da bancada são os seguintes:

- M.T-** Motor Elétrico,
- V.E-** Variador Eletromagnético de rotação,
- B.C-** Bomba Centrífuga com revestimento de borracha, rotor de 350 mm (14"),
- T.P-** Tomada de Pressão. Trata-se de uma peça executada a partir de um tarugo, segundo desenho de Eng. Malho T. Imamura,
- T.D-** Transdutor Diferencial de pressão (há dois transdutores, um para o trecho 1 e outro que pode ser usado no trecho dois ou no tubo de Pitot, na seção 3)
- T.T-** Tubo de Pitot,
- M.E-** Medidor Eletromagnético de vazão,
- T.M** Termômetro,
- S.T** Sensor do Termômetro.

Também faz parte da bancada um microcomputador que recebe os sinais enviados pelos instrumentos (transdutores de pressão diferencial, medidor eletromagnético e termômetro). Estes sinais após passarem por uma placa de conversão de sinais analógicos em digitais, são analisados através de um programa denominado AQUÍ3 (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, F.C.T.H.), calculando-se a vazão média, a perda de carga (trechos 1 e/ou 2) e a velocidade média local na tubulação de acrílico. A leitura dos dados é feita num período de tempo de 100 segundos, com 20 pontos por segundo o que oferece 2000 pontos para cada ensaio realizado.

5.2. CALIBRAGEM.

A calibragem dos instrumentos é feita periodicamente, sendo realizada esta, aproximadamente entre 2 e 3 meses quando são efetuados ensaios sistematicamente. Um ensaio com água limpa dá a possibilidade de verificar se todos os instrumentos funcionam adequadamente. Este processo de calibração pode ser feito para cada instrumento individualmente. Cuidado especial deve ser tomado com os transdutores de pressão, dada sua sensibilidade, sendo estes calibrados frequentemente (1 mes de ensaios continuados).

5.2.1. CALIBRAGEM DO MEDIDOR DE VAZÃO.

Foi feita mediante uma bancada apropriada existente no Centro Tecnológico de Hidráulica (C.T.H.). A equação obtida tem a forma:

$$Q = a(V - V_0) \quad (5.1)$$

sendo

$$a = 16.1 \text{ l/s.}\mu\text{v.}$$

O valor de V_0 é obtido para cada ensaio com $Q = 0$. O coeficiente de correlação da presente equação de calibragem em uso foi de 0,99999.

5.2.2. CALIBRAGEM DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO.

Como dito anteriormente, estes instrumentos são muito sensíveis, exigindo uma calibração periódica.

Esta aferição é feita numa bancada projetada para tais fins. A partir da aquisição de dados mediante um programa de computador apropriado, desenvolvido no C.T.H., pode-se obter, através de regressão linear, a equação do transdutor.

As equações usadas são:

$$\text{Transdutor 1} \quad \Delta H_1 = 75,77090(V - V_{01}) \quad (5.2)$$

$$\text{Transdutor 2} \quad \Delta H_2 = 75,93569(V - V_{02}) \quad (5.3)$$

sendo V_{01} e V_{02} os valores de tensão lidos nos transdutores quando a vazão é zero ($Q = 0$). Os termos numéricos de (5.2) e (5.3) tem unidades $\text{cm}/\mu\text{v}$.

5.2.3 DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO.

O valor do diâmetro da tubulação no trecho de medição da perda de carga foi obtido da medição do volume e do comprimento do tubo. O procedimento foi simples : preencheu-se o tubo com água pesando-o em seguida.

Os resultados obtidos são:

Tubo de P.V.C. $D=102,95 \text{ mm}$,

5.2.4 RUGOSIDADE DA TUBULAÇÃO.

O tubo de P.V.C. foi considerado como sendo tubo hidraulicamente liso. Comprova-se, após os resultados com água, que estes aderem à equação do regime liso.

Depois de feita a calibragem de cada um dos instrumentos isoladamente, verifica-se a performance do conjunto. Através da operação da bancada com água limpa e fazendo-se a leitura dos dados mediante o sistema de aquisição de dados obtinha-se os pares f e Re para diferentes valores de vazão. Estes valores foram comparados com os resultados teóricos

(para o tubo de P.V.C., regime hidraulicamente liso). Com os resultados obtidos pode-se observar que existe concordância com a teoria, sendo que os pontos caem sobre a curva de tubulação lisa, ou seja, cumprem com a lei de Prandtl-Kármán. Desta forma podiasse perceber que os instrumentos estavam funcionando de forma adequada.

5.3. SEÇÕES DE TESTES.

A bancada experimental foi projetada de modo que permite utilizar três (3) seções de trabalho: duas para medições de perda de carga em trechos retos e uma outra para a determinação do perfil de velocidades numa seção da tubulação de acrílico.

As características das seções de teste são as seguintes

-Seções 1 e 2 (trechos retos)

*Dimensões: diâmetro - $D = 102,95 \text{ mm}$ ($0,10295 \text{ m}$)

comprimento - $L = 3,00 \text{ m}$

*Material: P.V.C

*Rugosidade: considerado hidraulicamente liso. ($e \approx 0 \text{ mm}$)

*Medições a serem feitas: queda de pressão (perda de carga),

*Resultados a obter: diagrama de f vs Re para analisar a capacidade redutora dos polímeros.

Seção 3

*Dimensões: diâmetro - $D = 100 \text{ mm}$ ($0,1 \text{ m}$)

comprimento - $L = 2,00 \text{ m}$

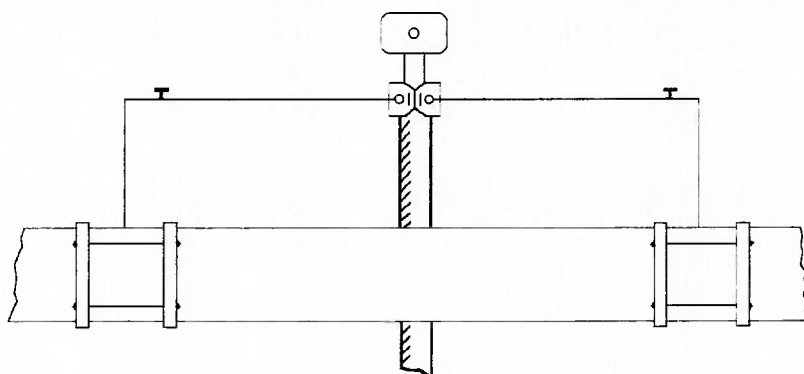
*Material: Acrílico

*Rugosidade: ≈ 0 (considerada tubulação lisa)

*Medições a serem feitas: pressão diferencial no tubo de Pitot

*Resultados a obter: perfil de velocidades na seção para analisar a influência da adição de polímeros na modificação do perfil.

Levando em consideração o fato apontado anteriormante, de que esta bancada foi projetada, aferida e utilizada pelo Prof. Nakae nas suas pesquisas, para maiores informações sobre a mesma, pode-se consultar a sua Tese de Doutorado (ver Nakae, T. 1994).



-Fig. (5.2) Esquema das seções de testes 1 e 2.

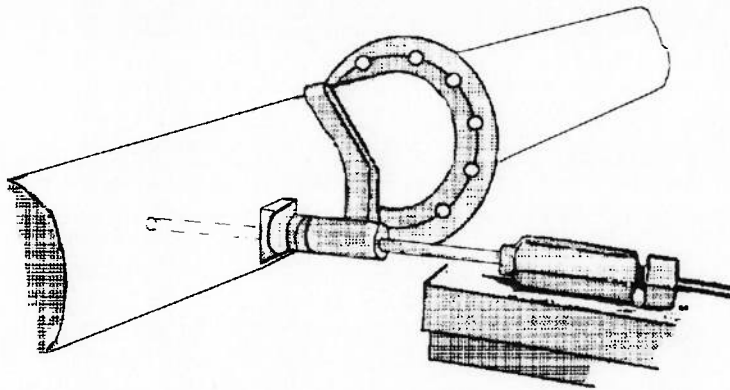


Fig. (5.3) Esquema da seção de teste 3.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos é importante destacar alguns aspectos que em certa medida limitaram o alcance dos ensaios e portanto impossibilitaram uma maior generalização do fenômeno em estudo. Primeiramente é necessário apontar o fato que a tubulação utilizada nos ensaios é lisa o que não permitiu trabalhar na zona de transição, ou seja, na região onde o coeficiente de perda de carga, f , depende dos valores do número de Reynolds e da rugosidade relativa; portanto os resultados ficam restritos ao regime hidraulicamente liso. Um outro aspecto a considerar é que pelo próprio projeto da bancada, a faixa de valores de Re está entre $1 \cdot 10^5$ a $5 \cdot 10^5$, trazendo a dificuldade que os aspectos relacionados com o início da R.A. não são passíveis de análise já que este fenômeno é caracterizado para valores de Re da ordem de $1 \cdot 10^4$. Numa tentativa de resolver este problema, além de se trabalhar com os valores obtidos experimentalmente vão-se extrapolar as curvas até a faixa de interesse de forma tal que possa ser estudado o fenômeno de início da R.A. Por último é importante salientar o fato que na realização dos cálculos as propriedades físicas da solução polimérica são consideradas com idênticos valores à água para as condições do escoamento (temperatura). A rigor a adição de polímeros provoca uma variação das propriedades (por exemplo: aumento da viscosidade) o qual teoricamente traz como resultado um aumento do coeficiente de perda de carga. Na realidade o que se verifica é uma diminuição deste, portanto considerar que as propriedades são iguais oferece-nos uma margem de segurança a favor dos resultados obtidos, aumentando então a faixa de confiabilidade dos resultados.

Tendo em vista o que foi exposto acima e considerando que nos limitaremos a trabalhar com um único tipo de solução polimérica em uma bancada específica, não foi possível a obtenção de uma relação que generalisasse os resultados. Este estudo todavia constitui a base de um outro muito mais geral e profundo que se pretende realizar como

pesquisa de doutoramento abordando o mecanismo físico de redução de arrasto, com estudos localizados na camada limite, observando-se a possível mudança em sua estrutura devido à adição de polímeros.

6.2. ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO MECÂNICA POR CISALHAMENTO.

Do ponto de vista prático, a determinação das características referidas à degradação mecânica por cisalhamento do IQAPOL PA é importante devido a que nos oferece o tempo máximo de ensaios sem que os resultados experimentais obtidos fiquem afetados. Deve-se lembrar que a Degradação Mecânica é definida como a perda da capacidade redutora de arrasto a qual pode ocorrer, principalmente, pelo intenso cisalhamento no interior da bomba. Outra causa para que aconteça este fenômeno é o envelhecimento da solução polimérica.

A análise da degradação mecânica é feita através da determinação do perfil de velocidade adimensional U^+ vs Y^+ , mediante a comparação dos perfis do solvente (água) e da solução polimérica para diferentes concentrações e tempos (tempo de circulação da solução polimérica na instalação, depois de preparada).

A avaliação da redução de arrasto foi feita para dois (2) valores de vazão (20 l/s e 30 l/s) e quatro (4) concentrações (10 (ou 5), 50, 70 e 110 ppm), tentando com isto achar uma generalização do fenômeno. A metodologia de cálculo das magnitudes adimensionais U^+ e Y^+ aparece no Anexo II-A.

As Figs (6.1)-(6.4) apresentam os resultados para vazão igual a 20 l/s e diferentes concentrações. Mostra-se a tendência dos perfis de velocidades de se aproximar ao da água com o passar do tempo. Para o tempo máximo testado (duas horas) é possível observar variações da ordem de 5 % com respeito à solução fresca. Para tempos maiores que duas horas é mantida esta tendência, e o perfil das soluções vai-se aproximando cada vez mais ao do solvente.

Como característica significativa pode-se ver que as declividades dos perfis são diferentes para as soluções poliméricas e para a água, fato este já comprovado para

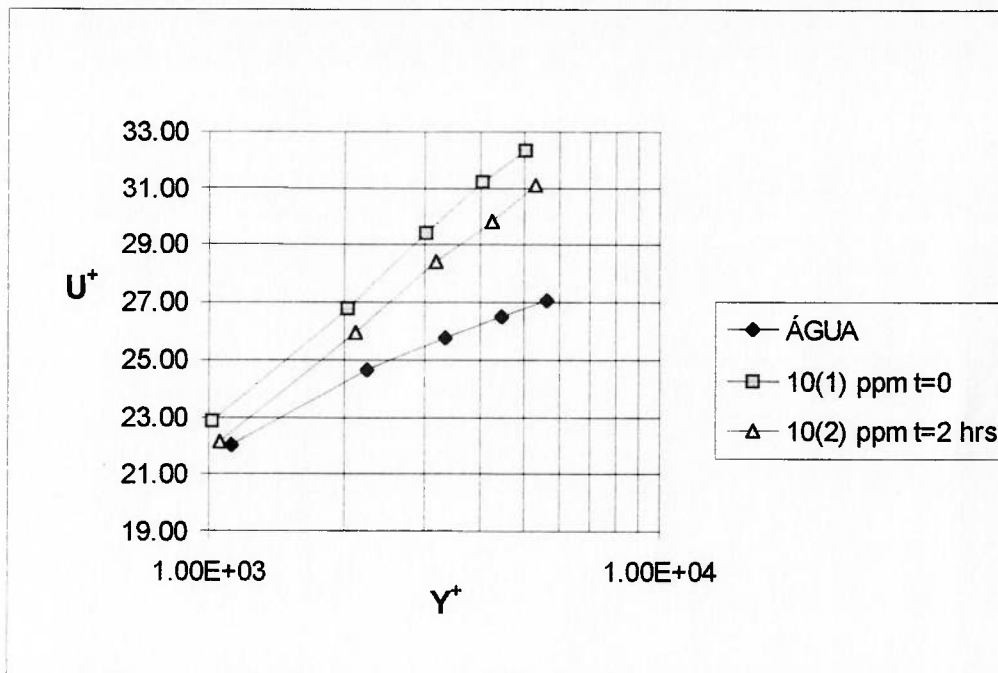


Fig. (6.1) Perfil de velocidade adimensional para 10 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.

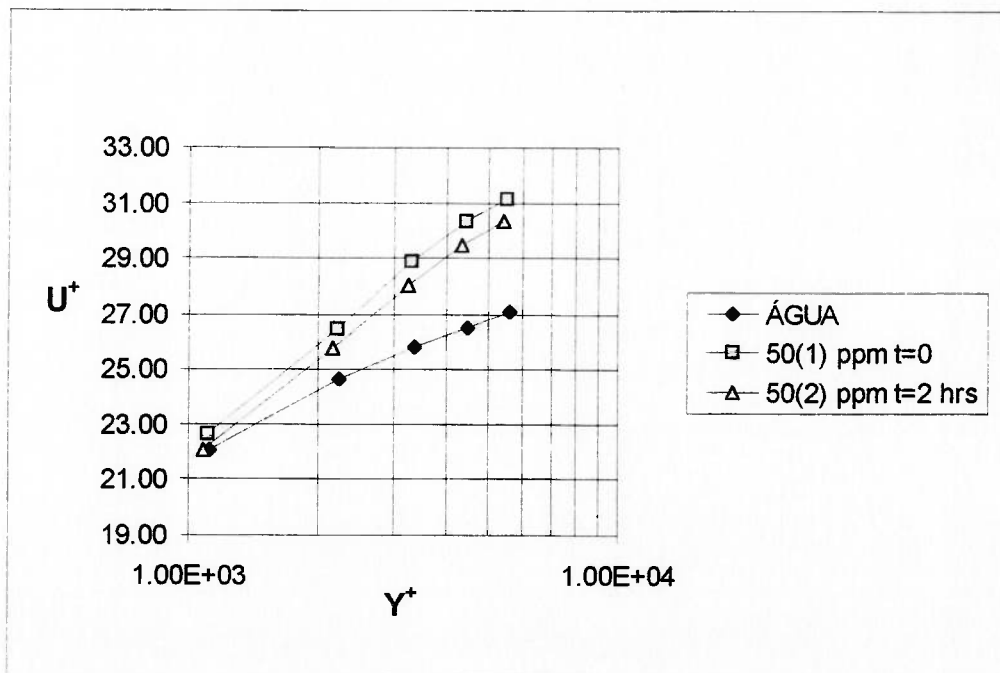


Fig (6.2) Perfil de velocidades adimensional para 50 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.

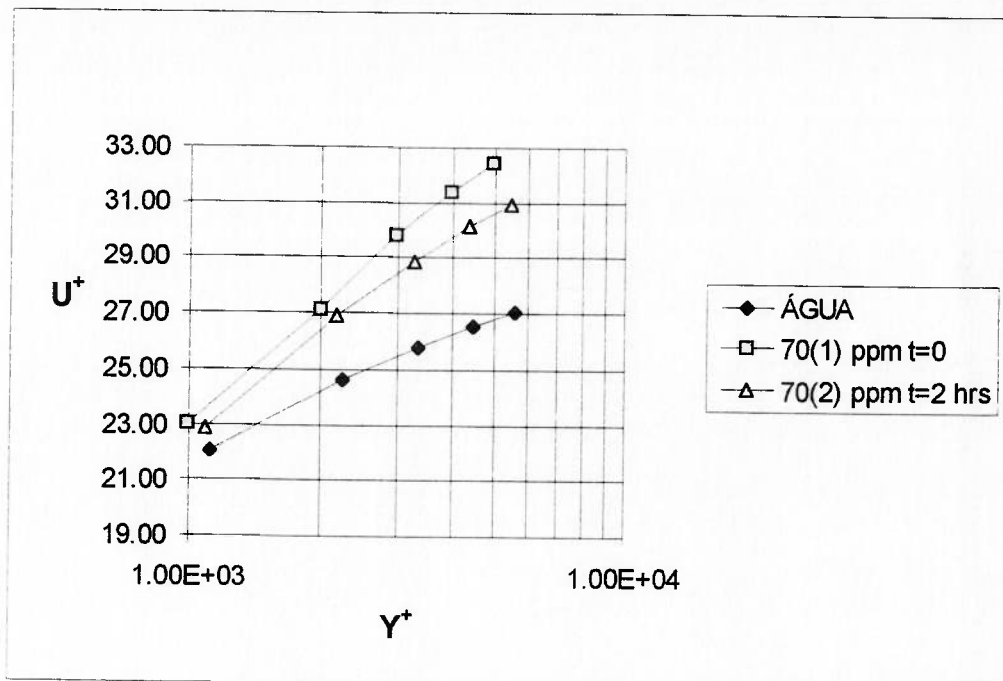


Fig. (6.3) Perfil de velocidade adimensional para 70 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 20 l/s.

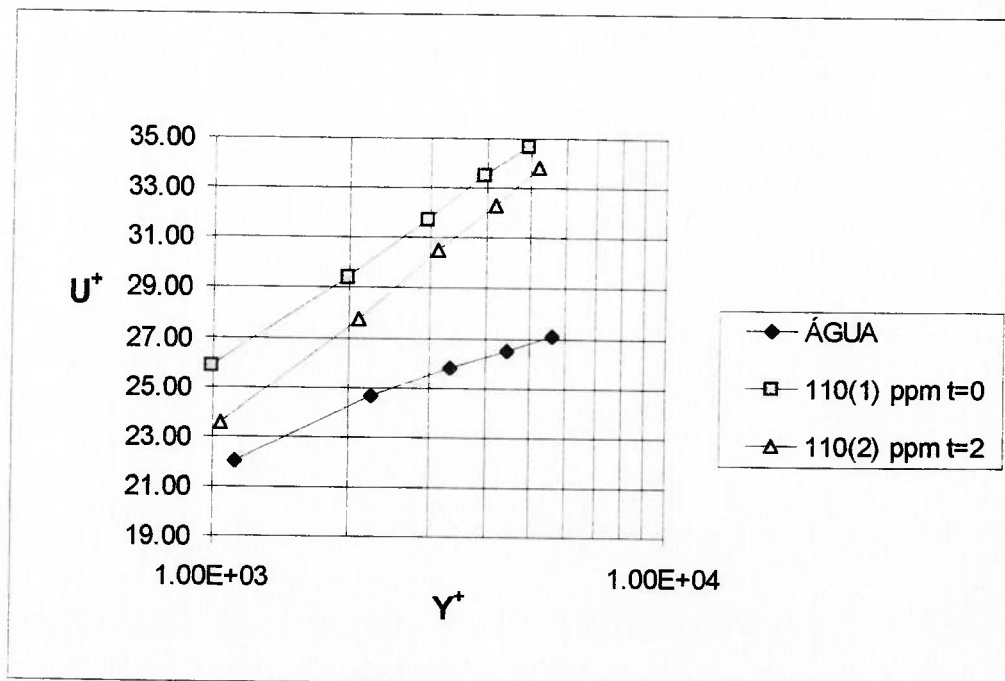


Fig. (6.4) Perfil de velocidade adimensional para 110 ppm de IQAPOL PA a 20 l/s.

soluções de poliacrilamidas (Separan AP302 e Separan AP30) em um outro estudo (Tam et al 1992) só que em outra faixa de valores (vide Fig. (6.8)).

Ao fazer a análise com 30 l/s e ($C_w = 5, 50$ e 70 ppm) Figs (6.5)-(6.7) é possível observar que acontece uma tendência similar, mantendo-se a ligeira mudança na declividade dos perfis e sendo mais notável o encostamento da curva para um tempo de duas horas de ensaios. A causa deste comportamento esta dado pelo aumento das condições turbulentas o que implica uma perda mais rápida da capacidade redutora de arrasto.

Como os nossos ensaios principais (perda de carga em um trecho reto de tubulação) são feitos em um intervalo de tempo de 30-40 minutos, estes caem na faixa entre as curvas do perfil de velocidade para $t = 0$ e $t = 2$ hrs com uma ligeira tendência a se encostar ao perfil de velocidades da solução fresca. Daqui portanto pode-se estabelecer que os nossos resultados experimentais são válidos e não correm o risco de

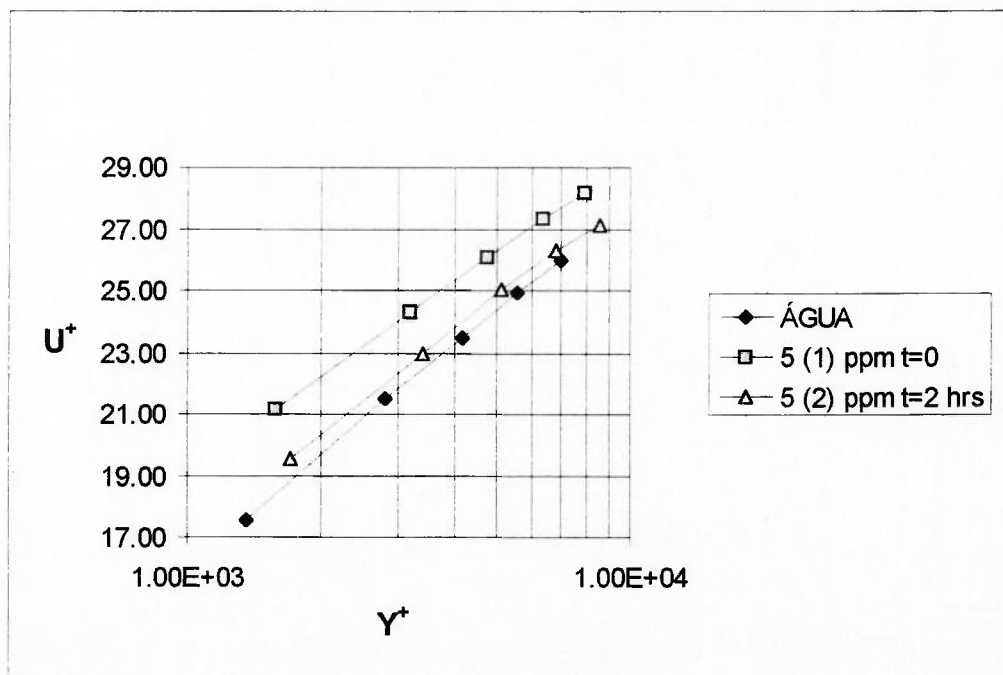


Fig. (6.5) Perfil de velocidade adimensional par 5 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.

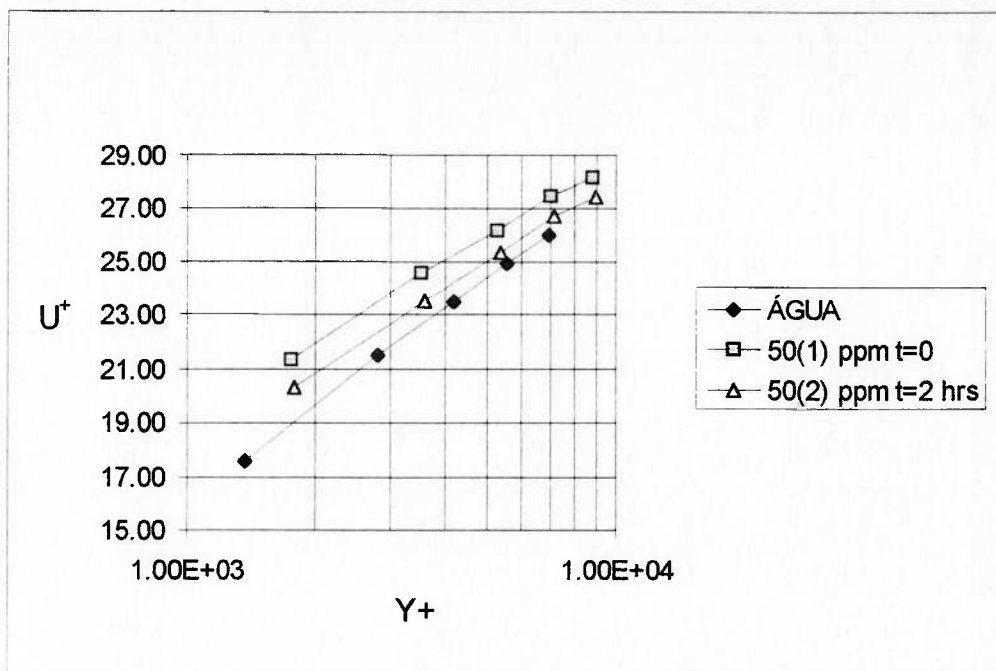


Fig. (6.6) Perfil de velocidade adimensional para 50 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.

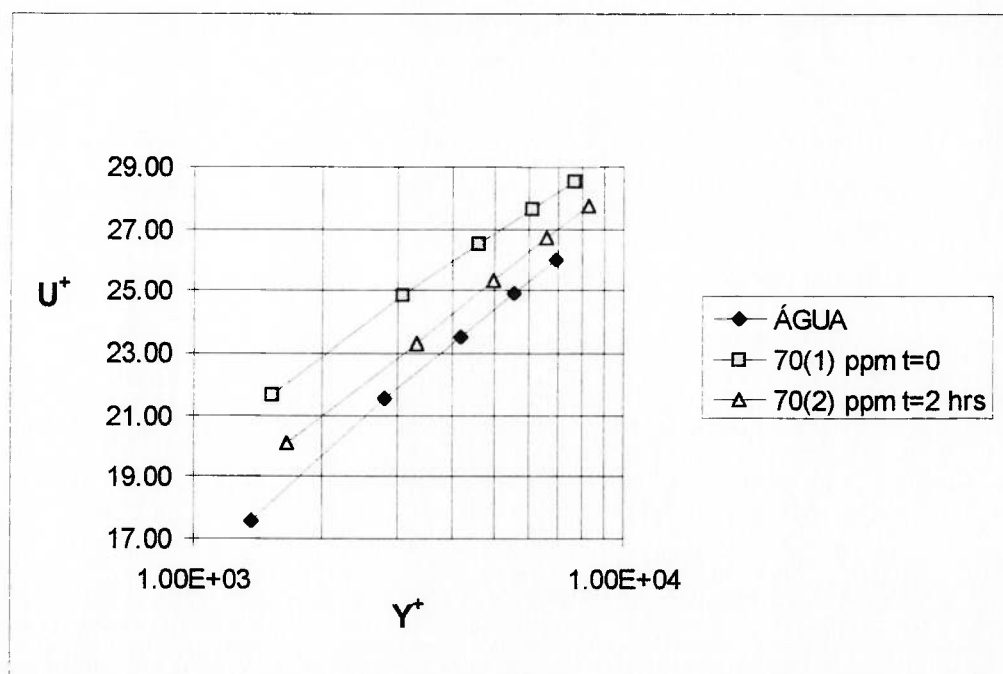


Fig. (6.7) Perfil de velocidade adimensional para 70 ppm de IQAPOL PA e uma vazão de 30 l/s.

estarem afetados pelo fenômeno da degradação mecânica.

Hoyt (1972) faz referências às limitações do tubo de Pitot para medições de velocidades de soluções poliméricas, destacando a necessidade de que seu uso ficasse restrito às aplicações onde a calibração precisa pudesse ser realizada sob as condições de uso. No nosso caso a existência de um medidor eletromagnético de vazão elimina qualquer limite no uso deste instrumento. A velocidade média do escoamento é determinada através da leitura do medidor eletromagnético e o tubo de Pitot é utilizado para as medições da velocidade local, sendo que para cada ensaio realizado é determinada a constante global de correção (k) e a constante do aparelho (C) (Ver Anexo II-A).

A Fig. (6.8) apresenta os resultados globais para 20 l/s. No sentido de permitir uma melhor comparação é incluída na figura a Assíntota de Máxima Redução de Arrasto (A.M.R.A), e os resultados obtidos por Tam et al (1992) para a poliacrilamida Separan AP30 com uma concentração de 50 ppm.

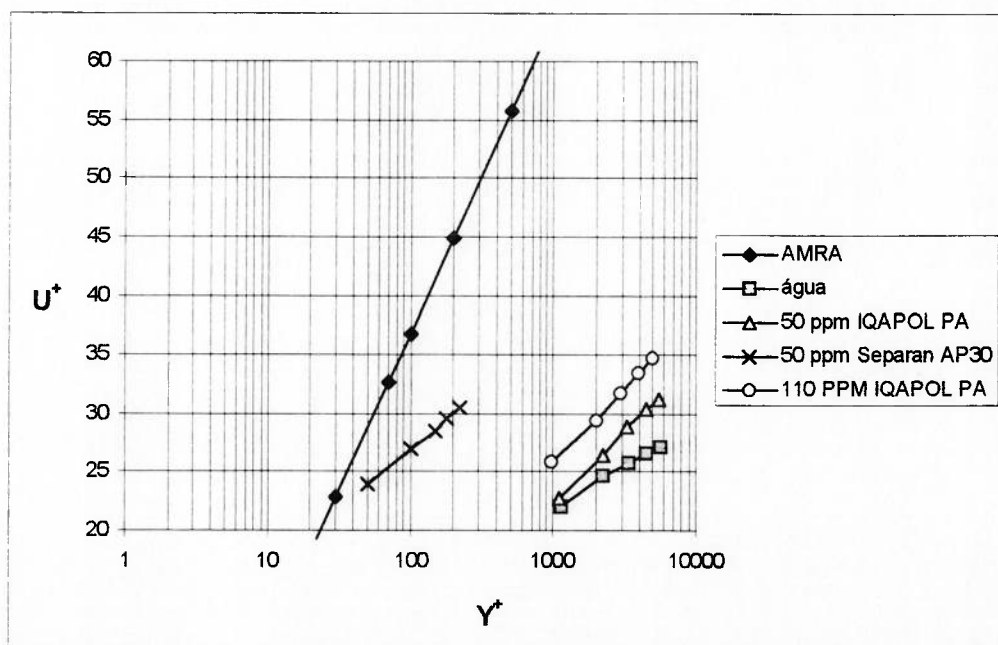


Fig. (6.8) Resultados comparativos do perfil de velocidade adimensional para o IQAPOL PA e para outro tipo de poliacrilamida (tomado de Tam et al 1992). Note-se a AMRA.

A A.M.R.A. é determinada pela expressão:

$$U^+ = 11,7 \ln Y^+ - 17 \quad (6.1)$$

Nesta figura podem-se ver algumas características importantes: a ligeira diferença de declividade nos perfis de velocidade das soluções de poliacrilamidas quando comparadas com o solvente; o grande afastamento das curvas do Separan AP30 e da A.M.R.A. quando comparadas com o IQAPOL PA o que nos dá uma idéia das características de redutor de arrasto médio deste polímero.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que o efeito da degradação mecânica é desprezível. Na utilização deste polímero como agente redutor, seja no tratamento de esgotos, no transporte de minério a longa distância ou em outras aplicações, deve-se ter em conta, que pelas próprias características dele, este tem a capacidade de se degradar por cisalhamento ou pelo fato de ser mesmo, um polímero biodegradável.

6.3. DETERMINAÇÃO DO GRÁFICO f vs Re .

A diminuição do coeficiente de perda, f , é uma consequência do efeito provocado pela adição de substâncias redutoras de arrasto a um escoamento turbulento. Portanto num estudo desta natureza, poder quantificar a magnitude da diminuição de f , assim como a dependência com relação à concentração é muito importante. A partir dos dados experimentais utiliza-se a metodologia apresentada no Anexo II-B.

A Fig (6.9) representa o gráfico de Moody (f vs Re) no qual aparecem os resultados das soluções poliméricas utilizando o IQAPOL PA a diferentes concentrações (5, 50, 70 e 110 ppm) e os resultados do solvente.

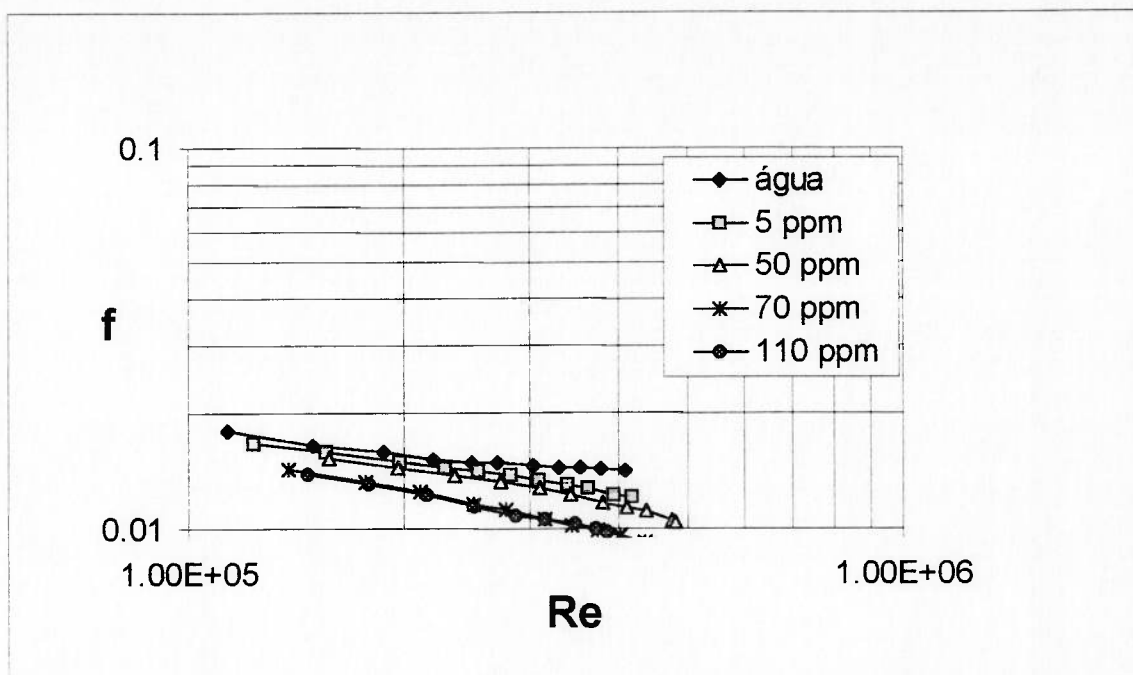


Fig.(6.9) Variação do coeficiente de atrito f . para diferentes concentrações de polímero.

Inicialmente pode-se destacar que foi comprovado que a curva da água adere-se perfeitamente à equação de Prandtl enquanto que para soluções poliméricas existe um afastamento da curva do regime hidraulicamente liso, caindo-se na zona de Regime Polimérico, onde o comportamento e a magnitude do efeito redutor dependem da concentração. Na Fig. (6.10) apresentam-se os resultados do coeficiente ψ , (Eficiência da Redução de Atrito), definido no Anexo II.B, para valores de Re de $2 \cdot 10^5$, $3 \cdot 10^5$ e $4 \cdot 10^5$. É possível observar que para as concentrações com números de $Re = 2 \cdot 10^5$ não existe um efeito importante na redução de arrasto ficando esta na ordem de 10 %. Só para as maiores concentrações (> 70 ppm) e valores de $Re = 4 \cdot 10^5$ o polímero alcança a região de efeitos médios na R.A. Quando comparados com outros agentes redutores de arrasto, como por exemplo o PEO 301, (Scrivener et al 1977) que consegue reduções da ordem de 40 % com baixos valores de concentração é possível comprovar o já estabelecido, que o IQAPOL PA, não se caracteriza por apresentar altos valores de R.A.

Note-se como uma prova disto, que nas figuras não aparece a A.M.R.A devido ao grande afastamento dela com respeito aos resultados com as soluções poliméricas ensaiadas.

Ao observar a Fig. (6.9) aparentemente podemos imaginar que o IQAPOL PA começa a atingir a A.M.R.A. para valores de $C_w > 70$ ppm. Uma análise muito cuidadosa da-nos a possibilidade de estabelecer que, embora muito próximas, as curvas para 70 e 100 ppm tem uma ligeira diferença. Talvez possa ser dito que a partir destes valores de concentração, a diminuição de f começa ser menos significativo.

A comprovação mais efetiva de que para estes valores ainda não é atingida a A.M.R.A. está no fato que o perfil de velocidades adimensional para esta última concentração é diferente daquela para 50 ppm, com a característica importante de se afastar mais do perfil da água e de se aproximar ao da A.M.R.A (ver Fig.(6.8)).

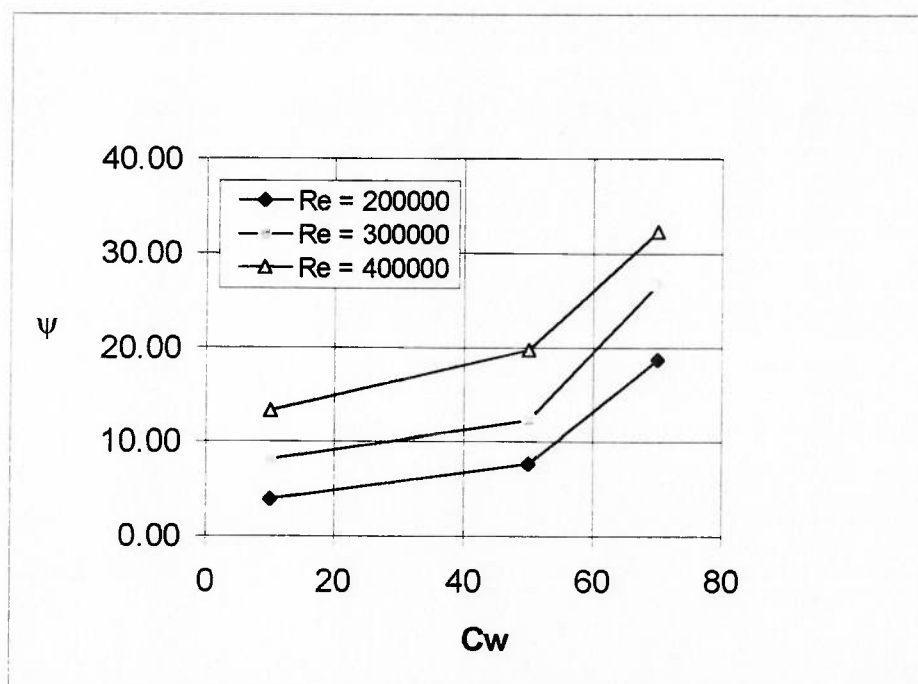


Fig. (6.10) Relação entre a Eficiência da Redução de Arrasto (ψ) e a concentração para diferentes valores de Re .

A partir dos resultados obtidos determinou-se uma equação para o cálculo do coeficiente de perda, f , como uma função do número de Reynolds (Re) e da concentração (C_w). Ajustando as curvas (f vs Re) segundo uma função logarítmica e buscando a relação dos coeficientes da mesma com a concentração tem-se que:

$$f = -A \log Re + B \quad (6.2)$$

sendo A e B coeficientes que dependem da concentração e podem ser representados pelas equações:

$$A = -9,2 \cdot 10^{-7} C_w^2 + 1,15 \cdot 10^{-4} C_w + 6,9 \cdot 10^{-3} \quad (6.3)$$

$$B = -5 \cdot 10^{-6} C_w^2 + 6 \cdot 10^{-4} C_w + 5,22 \cdot 10^{-2} \quad (6.4)$$

sendo C_w a concentração do polímero em ppm.

Uma outra forma de determinar os coeficientes A e B é graficamente, através das Figs. (6.11) e (6.12). Se utilizada a determinação gráfica, a equação (6.2), tem então a forma:

$$f = -(2,3A) \log Re + B \quad (6.5)$$

Os coeficientes de correlação no ajuste da função $f = f(Re)$, foram sempre maiores que 0,99 e para o ajuste dos coeficientes A e B , estão na faixa de 0,92 e 0,93, sendo que o ajuste polinômico (o escolhido) oferece melhores resultados que os outros ajustes possíveis neste caso (exponencial ou linear).

A Fig. (6.13) mostra uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os determinados através da equação (6.2). Pode-se observar que na faixa de trabalho (Re entre $1 \cdot 10^5$ e $5 \cdot 10^5$ e C_w entre 0,70 e 110) os erros estão na ordem de 5 % e só

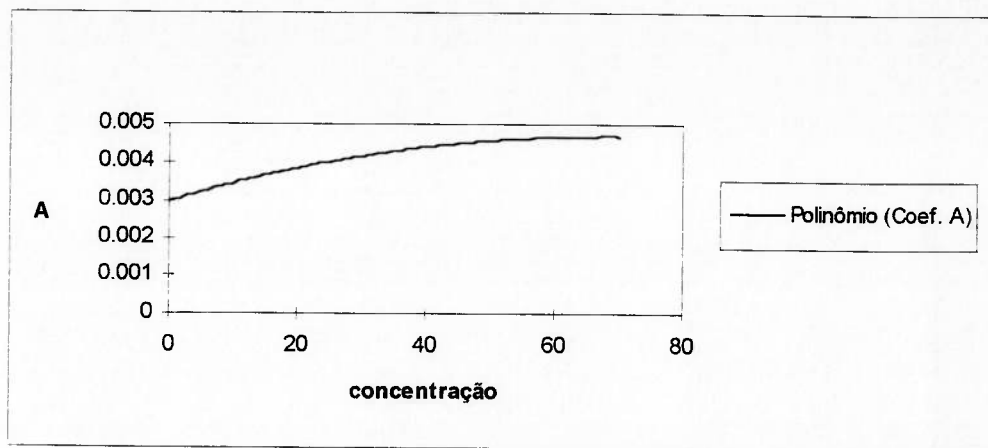


Fig. (6.11) Gráfico para a determinação do coeficiente A

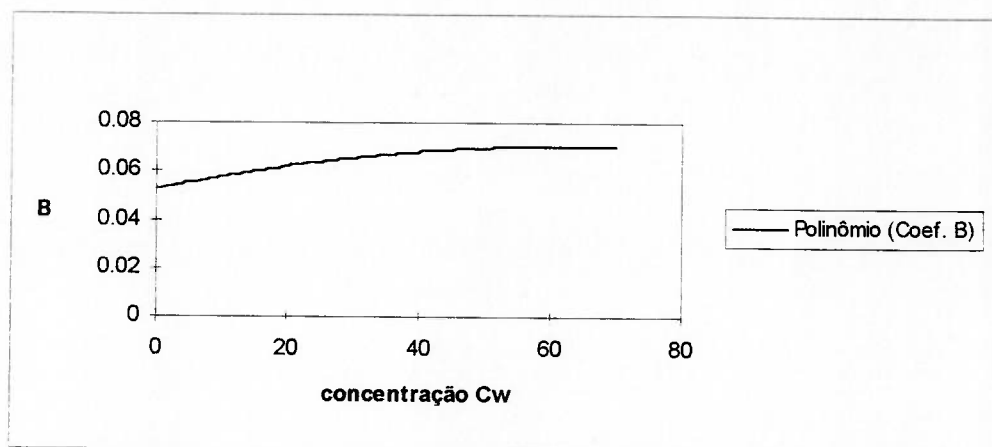


Fig. (6.12) Gráfico para determinar o coeficiente B

aumentam para os valores extremos das condições de ensaios. Nesta figura são apresentados só os valores extremos de concentração (0 e 110 ppm) para oferecer uma maior clareza da mesma.

A partir destes resultados e dentro da zona de estudos é possível estabelecer como sendo válida a equação (6.2).

Levando em consideração o que foi dito anteriormente e com o objetivo de estudar o início da redução de arrasto foi feita a extrapolação gráfica dos resultados (ver Fig. (6.14)) a qual pôde ser comprovada posteriormente por meio da equação (6.2).

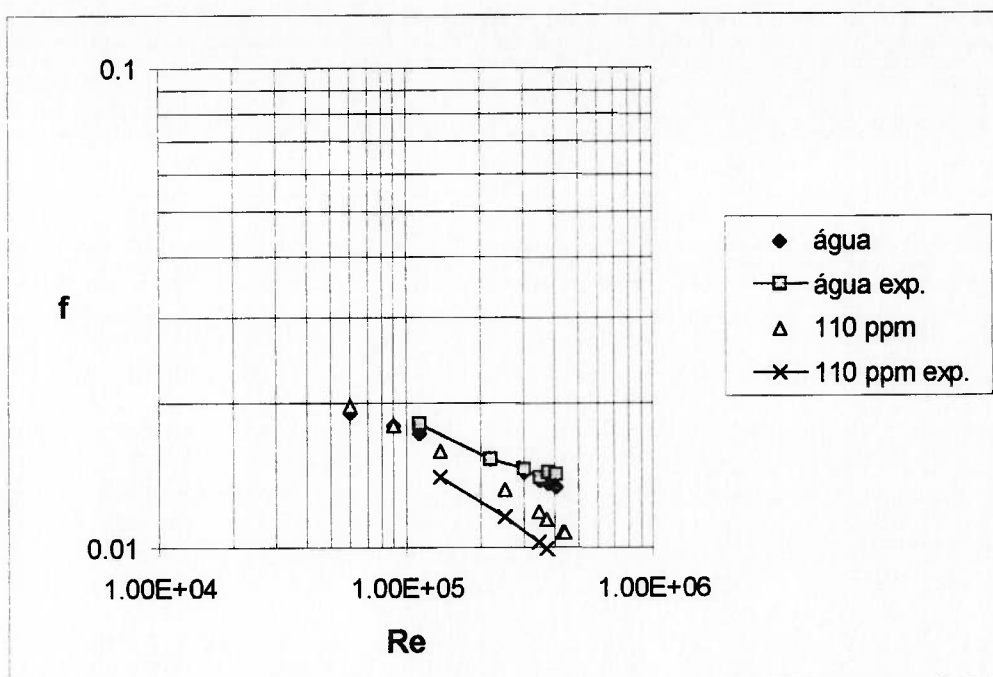


Fig. (6.13) Diagrama que mostra a comparação dos resultados experimentais e os da equação (6.2)

Desta análise é possível observar que a solução polimérica mostra o comportamento característico associado ao efeito Toms em tubulações lisas. O início da R.A é abrupto. Na Fig. (6.14) são identificadas as duas regiões típicas deste escoamento. Uma região (i) onde a solução polimérica e o solvente tem o mesmo comportamento, descrito pela equação de Prandtl (para tubulações lisas) onde não existe R.A e uma outra (ii) chamada região polimérica, onde existe R.A a qual vai depender da concentração, do regime de escoamento (Re) e do tipo de polímero usado. Nota-se que progressivamente, com o aumento da concentração as curvas vão-se afastando da curva da água. Existe uma terceira zona, a região da A.M.R.A., a qual neste trabalho não foi possível alcançar devido aos valores de concentração testados e às limitações da bancada experimental, que caracteriza o valor máximo de quantidade de polímero que pode ser adicionado para provocar algum efeito reductor. Neste caso maiores valores de concentração não

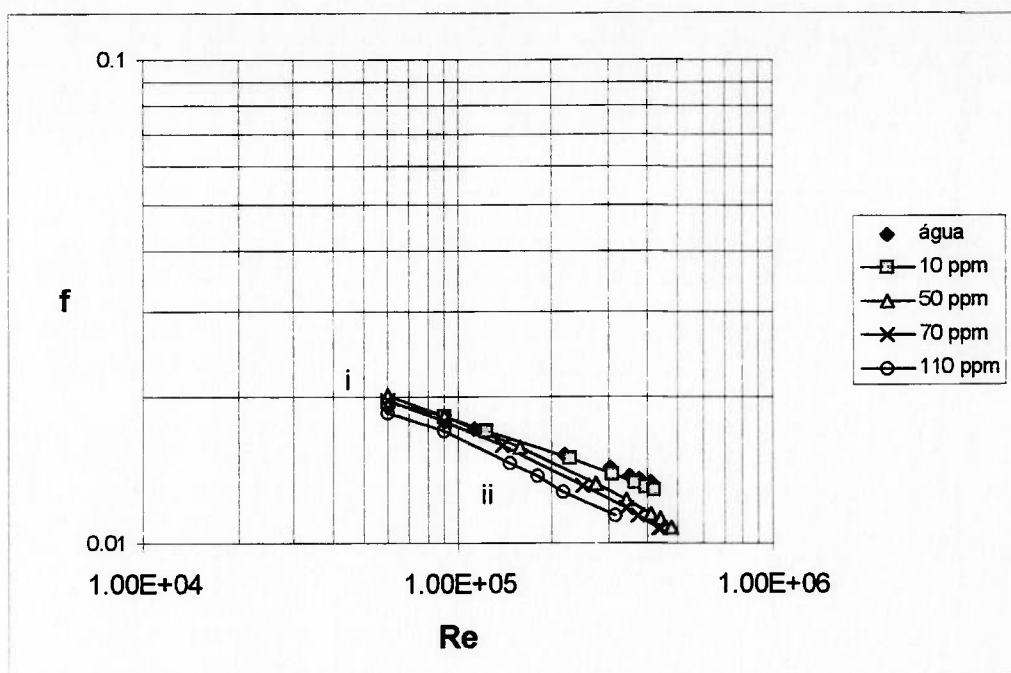


Fig. (6.14) Diagrama que mostra o início da R.A por extrapolação gráfica

produzem mais redução do coeficiente de perda de carga.

Do gráfico Q vs τ_w , é possível obter por extrapolação gráfica dos resultados deste trabalho o valor da tensão de cisalhamento na parede para as condições de início da R.A., τ_w^* , sendo que este valor está na ordem de 2 N/m^2 . Da equação

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6.6)$$

aplicada esta também para o início da R.A. (portanto $\tau_w = \tau_w^*$ e $u_* = u_*^*$) tem-se que $u_*^* = 0.045 \text{ mm/s}$ a qual pode ser considerada baixa ($< 100 \text{ mm/s}$) de acordo com Sellin 1982.

6.4. COEFICIENTE DE ATRITO.

O coeficiente de atrito (ou também chamado fator de Fanning), C_f , pode ser definido a partir da aplicação da Equação da Quantidade de Movimento para um volume de controle que coincida com a seção de testes, obtendo-se:

$$\tau_w = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot L} \quad (6.7)$$

Da equação de Energia aplicada a este mesmo volume de controle; tem-se que:

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{\langle U \rangle^2}{2 \cdot g} \quad (6.8)$$

substituindo (6.8) em (6.7), resulta:

$$\tau_w = \frac{f \cdot \langle U \rangle^2 \cdot \rho}{8} \quad (6.9)$$

Sabendo da literatura que:

$$\tau_w = \frac{C_f \cdot \langle U \rangle^2 \cdot \rho}{2} \quad (6.10)$$

igualando (6.9) e (6.10), tem-se finalmente que:

$$C_f = 4f \quad (6.11)$$

Desta relação podemos observar, analiticamente, que ao existir uma diminuição de f devido à adição de polímeros o coeficiente de atrito diminui proporcionalmente. Isto é possível observar na Fig. (6.15) onde aparecem os resultados de C_f vs Re .

A modo de comparação estabeleceu-se o coeficiente Γ , que mede a porcentagem da diminuição de C_f com a concentração, sendo este determinado como:

$$\Gamma = \frac{|C_{f_s} - C_{f_p}|}{C_{f_s}} 100 \quad (6.12)$$

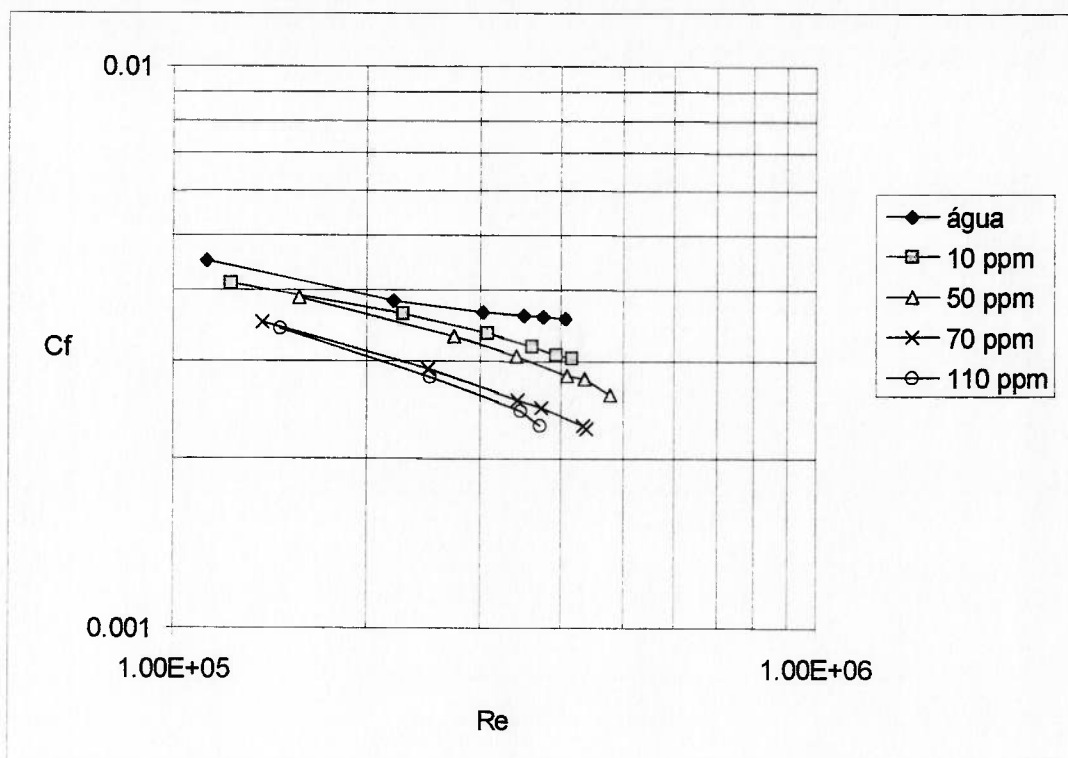


Fig. (6.15) Representação da variação de C_f vs Re para várias concentrações e uma vazão de 20 l/s.

A Fig. (6.16) oferece uma clara visão da variação do coeficiente Γ .

Como visto anteriormente existem teorias que estabelecem que a R.A. começa para um valor de tensão de cisalhamento na parede, τ_w^* , que independe da concentração.

Como uma tentativa de estabelecer a existência e a magnitude da espessura da subcamada elástica (S.C.E), como elemento importante ao analisar o fenômeno da R.A., na Fig. (6.17) aparece representado o perfil de velocidades adimensionalizado usando o modelo das três subcamadas de Virk (1971). Nesta figura são mostradas as regiões mais importantes como:

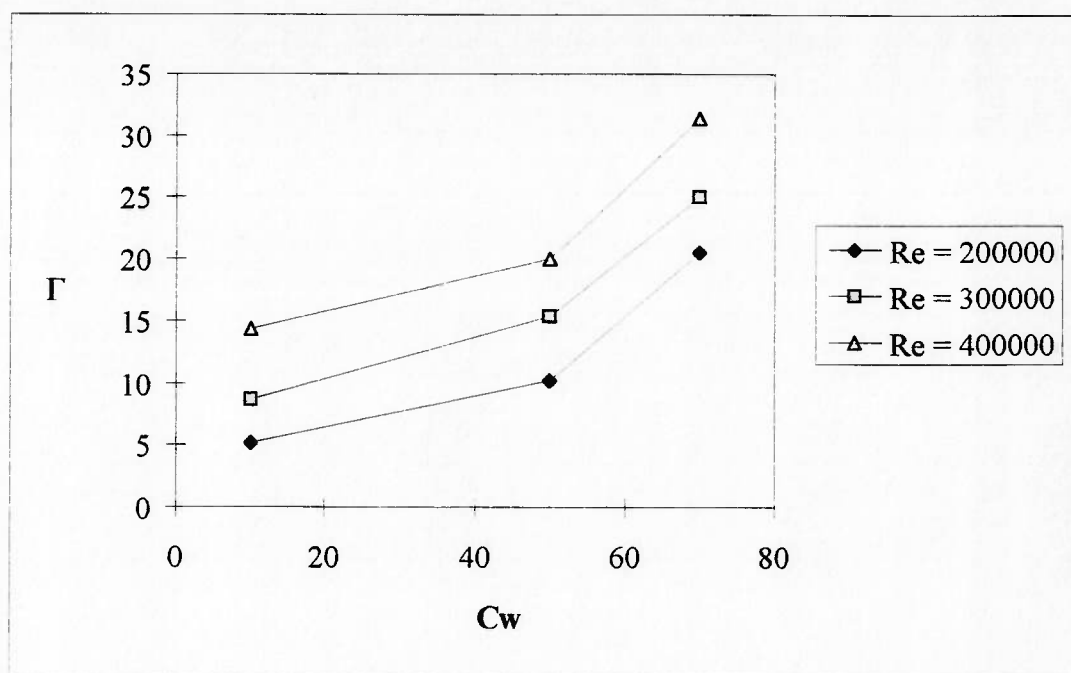


Fig. (6.16) Relação entre o coeficiente Γ e a concentração.

- i) Subcamada elástica
- ii) a A.M.R.A
- iii) as curvas para o solvente e para a solução polimérica a uma determinada concentração .

Com o prolongamento da curva da água até a interseção com a A.M.R.A. é possível obter, segundo o modelo de Virk (1967), o valor do número de Reynolds adimensional, Y^* , correspondente à espessura da subcamada viscosa. Este valor foi $Y^* \approx 8$. Da mesma forma procede-se para as curvas de 70 e 110 ppm. As diferenças entre os valores para água e para solução polimérica determinam a espessura da S.C.E. Note-se que para 70 ppm esta ficou na faixa $8 < Y^* < 10$ e para 110 ppm os valores foram $8 < Y^* < 12$ aproximadamente.

É possível observar dois fatos importantes e característicos para esta figura. Primeiro a existência de uma relação entre a concentração e a espessura da S.C.E. Na medida que aumenta a concentração existe um incremento da espessura da S.C.E. Um

outro elemento importante é a diferença nas declividades para os perfis da solução polimérica e da água (conforme estabelecido anteriormente).

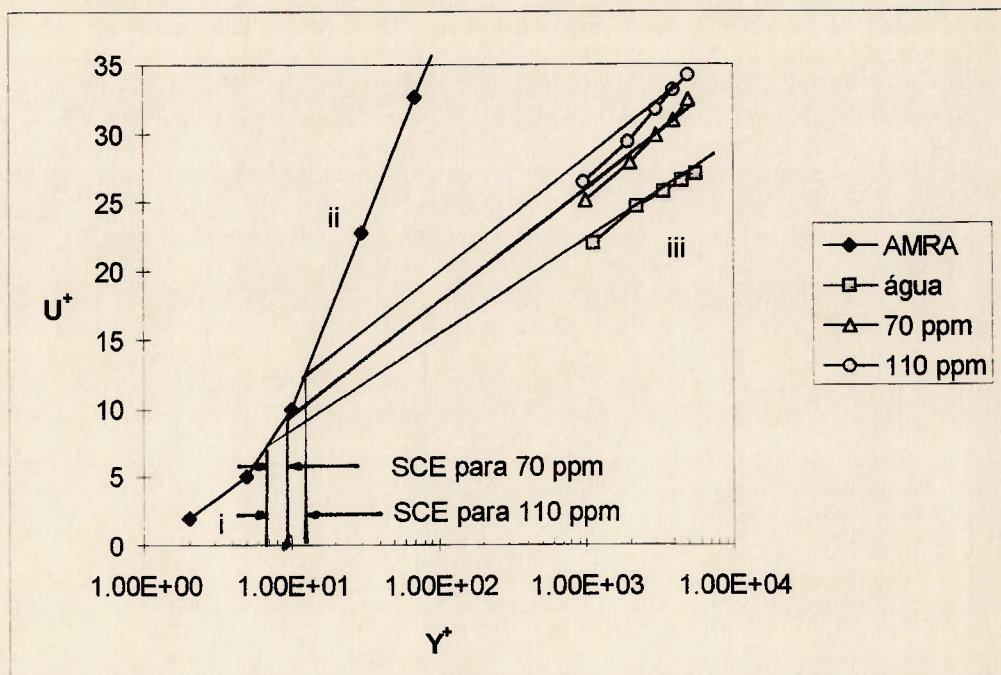


Fig. (6.17) Perfil de velocidade adimensionalizado segundo o modelo da Subcamada Elástica de Virk.

6.5. VERIFICAÇÃO DA EQUAÇÃO VORTINSKAYA.

Vortinskaya (apud Ravinovich 1987) apresenta a seguinte equação para o cálculo do fator de atrito em soluções poliméricas:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\left(\frac{2,8 u_*}{\langle U \rangle \sqrt{f}} \right)^{\frac{\beta}{5,75}} \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{e}{3,7D} \right) \right] \quad (6.13)$$

a que permite relacionar o coeficiente f com alguns outros parâmetros como concentração, velocidade de atrito, velocidade média na seção e a rugosidade relativa.

Nesta equação β é o termo que depende da concentração e pode ser calculado pela expressão

$$\beta = 10^3 C \quad (6.14)$$

sendo C a concentração volumétrica (em %). Esta expressão é válida para $0,005 < C < 0,012\%$. Pode verificar-se que para o escoamento de água ($C = 0$, $\beta = 0$) e a equação acima resulta a equação de Colebrook-White.

Como uma forma de avaliar os resultados obtidos, vai-se comparar agora, o coeficiente de perda de carga, f , por três vias:

- pelos resultados experimentais,
- pela equação de Vorstinskaya (6.13),
- pela equação proposta neste trabalho (6.2).

É bom destacar o fato que a faixa de validade da equação (6.13), só é cumprida para valores de concentração igual a 50 ppm e a 70 ppm, embora esta última fique muito perto do limite (concentração volumétrica igual a 0,0076 % e 0,10 % respetivamente).

Os resultados, conforme determinados aparecem nas tabelas (6.1) e (6.2).

Dados gerais para o cálculo de f segundo a equação (6.13), a 50 ppm:

- concentração volumétrica = 0,0076 %
- β segundo a equação (6.14) = 7,6
- Os outros valores para o cálculo foram determinados segundo os Anexos II-A e II-B.
- O valor inicial para a determinação de f , foi escolhido como sendo o valor experimental para o valor de Reynolds correspondente.
- Como trabalhou-se com tubulação lisa o último termo da equação (6.13) não é considerado.

Tabela (6.1) Resultados da comparação dos coeficientes f para 50 ppm.

Re	f exp.	f eq. (6.13)	f eq. (6.2)	% difer. exp. vs 6.13	% difer. exp. vs 6.2
1.57E+05	0.0153	0.0153	0.0158	0	3.26
1.96E+05	0.0145	0.0145	0.0149	0	2.75
2.35E+05	0.0137	0.0137	0.0141	0	2.91
2.74E+05	0.0132	0.0132	0.0132	0	0
3.09E+05	0.0127	0.0127	0.0128	0	0.78
3.41E+05	0.0122	0.0125	0.0123	2.45	0.81
3.79E+05	0.0117	0.0124	0.0119	5.98	1.709
4.09E+05	0.0113	0.0123	0.0115	8.84	1.76
4.36E+05	0.0112	0.0121	0.0112	8.03	0
4.75E+05	0.0105	0.0118	0.011	12.38	4.76
4.78E+05	0.0104	0.0118	0.0108	13.46	3.84

Dados gerais para o cálculo de f segundo a equação (6.13), a 70 ppm:

- concentração volumétrica = 0,1064 %
- β segundo a equação (6.14) = 106,4
- Cumpre-se os três últimos itens que para 50 ppm.

Como resultado da análise das tabelas (6.1) e (6.2) e das Fig. (6.18) e (6.19) pode-se estabelecer a validade dos resultados e das equações devido ao pequeno erro relativo entre estes valores. Como dito anteriormente os erros aumentam

fundamentalmente para os valores de Reynolds maiores o qual coincide com apreciações feitas anteriormente.

Tabela (6.2) Resultados da comparação dos coeficientes f para 70 ppm.

Re	f exp.	f eq. (6.13)	f eq. (6.2)	% difer. exp. vs 6.13	% difer. exp.vs 6.1
1.38E+05	0.0153	0.0153	0.0159	0	3.92
1.77E+05	0.0133	0.0133	0.0149	0	12.03
2.11E+05	0.0125	0.0125	0.0141	0	12.8
2.50E+05	0.0116	0.012	0.0132	3.44	13.79
2.78E+05	0.0112	0.0117	0.0128	4.46	14.28
3.14E+05	0.0106	0.0115	0.0123	8.49	16.03
3.43E+05	0.0102	0.011	0.0119	7.84	16.66
3.74E+05	0.0099	0.0106	0.0114	7.07	15.15
4.02E+05	0.0096	0.0105	0.0111	9.375	15.62
4.33E+05	0.0092	0.0101	0.0107	9.78	16.30
4.22E+05	0.0091	0.01	0.01	9.89	9.89

Os problemas de operação expostos no trabalho para vazões maiores que $35 \text{ m}^3/\text{s}$, está referido ao fato que a bancada foi projetada com a tubulação de retorno ao reservatório acima da sucção da bomba. Para vazões alta existe muita turbulência na sucção da bomba e portanto entra ar no sistema, fazendo com isto que diminua a precisão dos resultados.

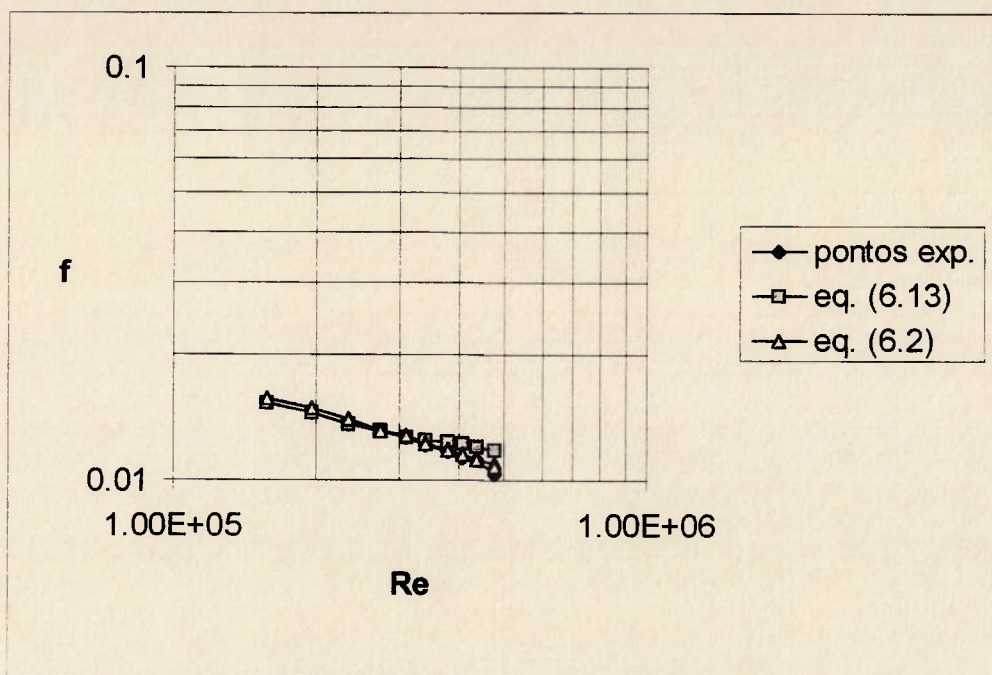


Fig. (6.18) Comparação dos valores do coeficiente "f" para 50 ppm.

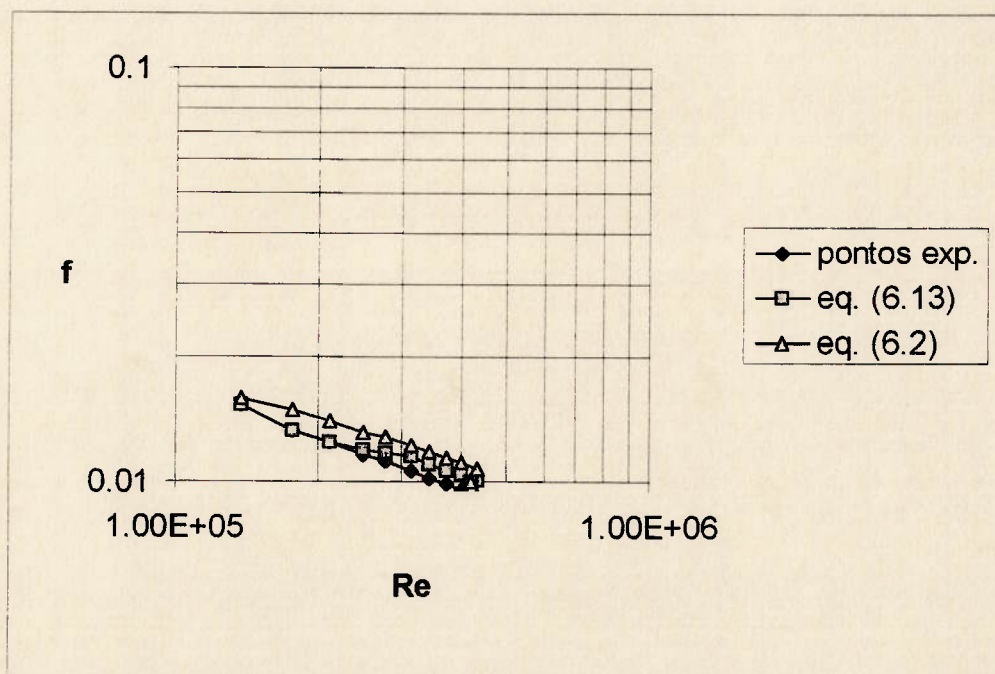


Fig. (6.19) Comparação dos valores do coeficiente "f" para 70 ppm.

6.6. CORRELAÇÃO GERAL DE TAM.

A seguir, faremos brevemente algumas considerações gerais sobre a correlação proposta por Tam et al (1992).

Esta correlação foi obtida a partir do modelo de comprimento de mistura de Prandtl e dos resultados experimentais gerados em uma instalação com as seguintes características:

- Tubulação de vidro de 9 mm de diâmetro interior.
- Sistema de Anemometria Laser para medição da velocidade.
- Faixa de Reynolds entre 4000 e 15000.
- Quatro tipos de polímeros diferentes.
- Concentração entre 20 e 200 ppm.

A correlação desenvolvida tem a forma:

$$\alpha(U_p^+ - \Gamma) + \beta = 2,43 \ln Y^+ + 6,5 \quad (6.15)$$

onde os valores de α , β e Γ são função somente do termo ε :

$$\varepsilon = \frac{u.}{\langle U \rangle} \quad (6.16)$$

e podem ser determinados pelas relações seguintes:

$$\alpha = -2.864 + 105.5\varepsilon - 654.4\varepsilon^2 \quad (6.17)$$

$$\beta = 24.98 - 679.9\varepsilon + 4140\varepsilon^2 \quad (6.18)$$

$$\Gamma = -396.1 + 1.692 \cdot 10^4 \varepsilon - 1.665 \cdot 10^5 \varepsilon^2 \quad \text{para } \varepsilon < 0.05 \quad (6.19)$$

$$\Gamma = 2.2 \quad \text{para } \varepsilon > 0.05 \quad (6.20)$$

Ao estabelecer a validade da correlação (6.15), os autores comparam os resultados experimentais com os obtidos pela correlação, comprovando que estes apresentam boa concordância. Nas conclusões do trabalho de Tam et al (1992) existem dois itens realmente conflitantes. Em um ponto estabelecem que a equação (6.15) permite determinar com precisão o perfil de velocidade adimensional para "qualquer solução polimérica". Mas em outro ponto, fixam que os testes estão restrito só a quatro polímeros, a uma faixa de concentração entre 20 e 200 ppm e Re entre 4000 e 15000.

Partindo disto e levando em consideração que os nossos ensaios foram feitos em uma bancada com condições diferentes:

- Diâmetro da tubulação 100 mm,
- Tubulação de P.V.C,
- Números de Reynolds na faixa de 10^5 a 5.10^5 ,
- Concentrações na faixa de 10 a 110 ppm,
- Tubo de Pitot para a medição das velocidades locais.

tentamos comprovar a generalidade da correlação.

Os resultados aparecem nas Fig. (6.20) e (6.21), para concentrações de 50 ppm e 70 ppm respectivamente. A análise não precisa de muitos comentários. Simplesmente para as condições de nossos ensaios experimentais a correlação geral de Tam não apresenta bons resultados.

Acredita-se que estes resultados devam-se fundamentalmente ao fato da correlação ter sido obtida para condições muito específicas e portanto fica muito difícil tentar obter uma conclusão geral de um fenômeno muito complexo onde intervém diversas variáveis e onde, ainda, não existem bases sólidas para definir relações universais e explicar por que acontece a R.A. Estes elementos conflitantes, podem constituir o ponto de partida na tentativa de estabelecer alguma (ou algumas) correlações, se possível, que permitam a análise do comportamento das soluções poliméricas em uma ampla faixa de números de Reynolds, concentrações, tipo de polímeros e condições das tubulações (lisas ou rugosas).

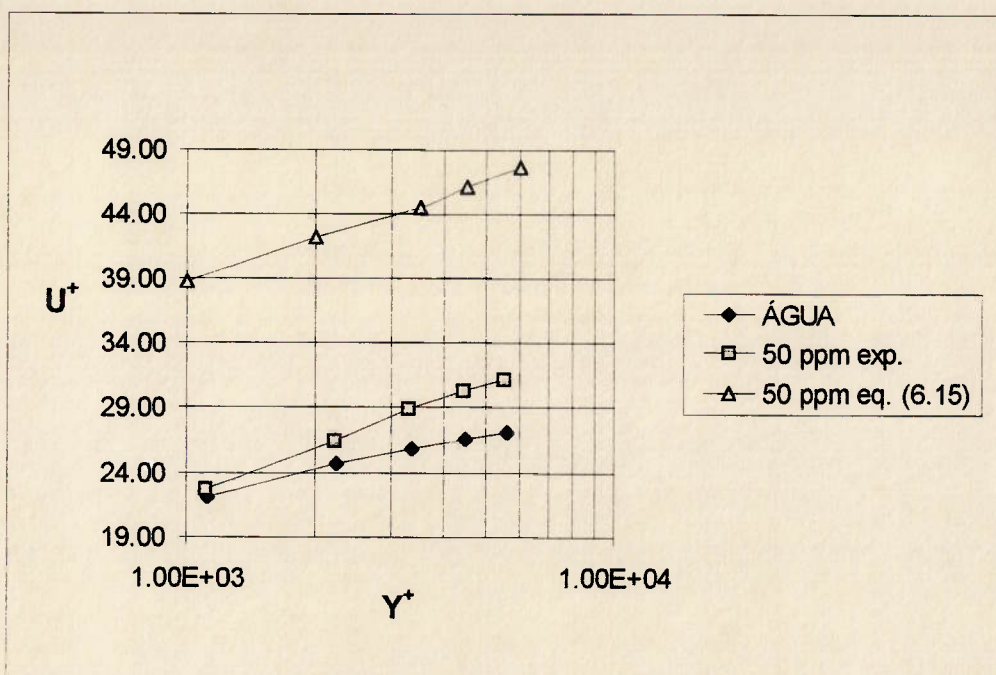


Fig. (6.20) Comparação da aplicação da Correlação de Tam com os presentes resultados experimentais para 50 ppm.

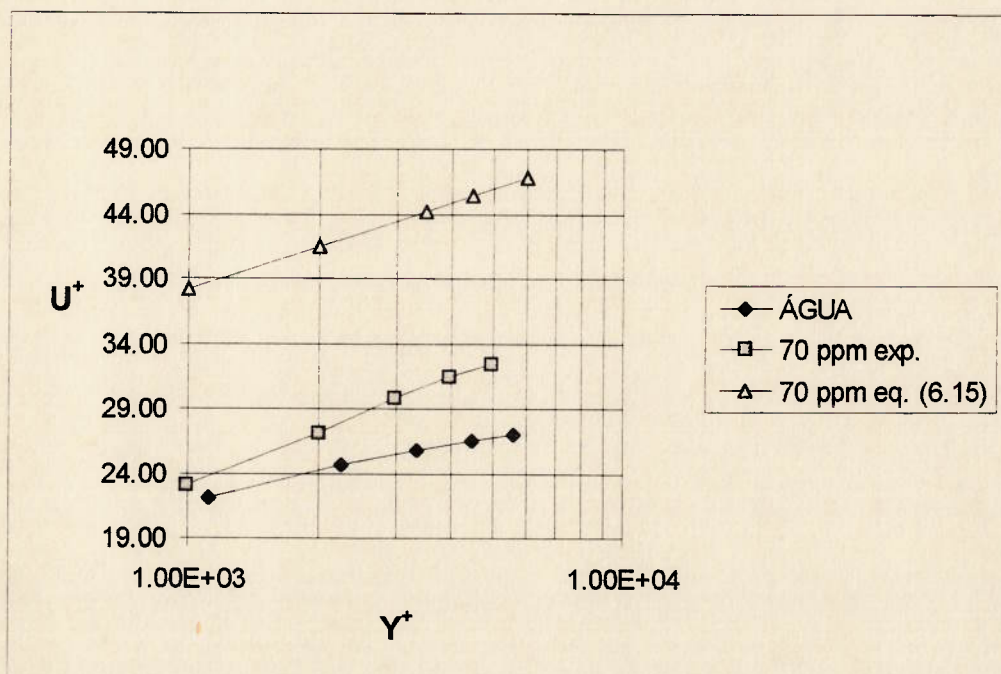


Fig. (6.21) Comparação da aplicação da Correlação de Tam com os presentes resultados experimentais para 70 ppm.

CONCLUSÕES.

A partir do estudo feito e dos resultados experimentais obtidos, estabelecem-se as seguintes conclusões e recomendações:

1) Foi efetivamente comprovado o efeito redutor do IQAPOL PA, sendo que pelos resultados obtidos este pode ser considerado como redutor de arrasto médio. O perfil de velocidade adimensionalizado apresenta uma declividade diferente daquela do solvente, existindo um deslocamento deste, em função da concentração. Devido ao fato referido anteriormente (R.A. médio) este polímero não apresenta deslocamentos significativos do perfil de velocidade adimensionalizado com respeito ao do solvente.

2) No diagrama de f vs Re obtido, aparecem as duas regiões possíveis: O regime turbulento sem R.A, onde a solução polimérica e o solvente tem o mesmo comportamento, e o regime turbulento com R.A, também chamado Regime Polimérico, onde a magnitude da Redução de Arrasto vai depender do tipo de polímero, da concentração e do regime do escoamento. A Eficiência da Redução de Arrasto (E.R.A), é pequena ($\approx 10\%$) para $Re \approx 1.10^5$ e pequenas concentrações; esta eficiência é média ($\approx 30\%$) para maiores valores de Re e de concentração, embora deve-se lembrar que nesta última faixa aumentam os erros e diminuem a precisão dos resultados.

3) Determinou-se uma equação para calcular o coeficiente de perda de carga, f , como uma função de Re e da concentração que tem a forma:

$$f = -A \log(Re) + B$$

sendo A e B coeficientes que dependem da concentração e que podem ser determinados graficamente pelas Fig. (6.11) e (6.12), ou pelas equações

$$A = -9,2 \cdot 10^{-7} C_w^2 + 1,15 \cdot 10^{-4} C_w + 6,9 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5 \cdot 10^{-6} C_w^2 + 6 \cdot 10^{-4} C_w + 5,22 \cdot 10^{-2}$$

cujos resultados são válidos na faixa de análise (concentrações entre 10 e 110 ppm e números de Reynolds entre 10^5 e $5 \cdot 10^5$) com erros da ordem de 4-6 % para as menores concentrações e ao redor de 12 % para os valores maiores.

4) Mediante a utilização do modelo da S.C.E. de Virk, ficou demonstrado que para o IQAPOL PA a espessura da subcamada é muito pequena, confirmando o caráter de redutor de arrasto médio. Os valores de $Y^+ > 8$ obtidos concordam com os resultados da literatura, sendo determinada a relação qualitativa entre a espessura da S.C.E. e a concentração. Quanto maior é a concentração maior será a espessura da S.C.E.

5) Determinou-se a relação entre os coeficientes f , C_r e as concentrações das soluções poliméricas podendo-se comprovar que efetivamente a adição de polímeros induz uma diminuição de f e conseqüentemente de C_r . As magnitudes de tais reduções apresentam a mesma tendência gráfica e numérica: baixas porcentagem de R.A. para valores de Re e concentração menores e porcentagem média de R.A. para maiores valores de Re e de concentração.

6) Ao comparar os resultados das equações (6.2) e (6.6) com os obtidos experimentalmente, pode-se verificar que todos os valores do coeficiente f estão numa faixa de erros máximos de 10-15 %. Daquí determina-se a possibilidade do uso das mesmas nas suas faixas de validade.

8) Ao aplicar a correlação geral de Tam aos resultados experimentais foi comprovado que esta não é válida para os nossos resultados, portanto não pode ser considerada como geral e aplicável a "qualquer solução polimérica" como mencionado no referido trabalho. A diferença dos valores é consideravelmente grande.

7) Não foi possível, devido às próprias condições da bancada experimental, trabalhar com tubulações de diferentes rugosidades para obter uma maior generalização da R.A. estudando

os aspectos relacionados com a zona de transição do escoamento hidráulicamente liso ao totalmente rugoso. Sugere-se portanto a possibilidade de continuar o estudo obtendo uma maior base de dados experimentais (para diferentes polímeros e tubulações) e o maior tratamento matemático da equação proposta.

COMENTÁRIOS FINAIS.

Levando em consideração os resultados obtidos neste trabalho, em um futuro vai-se estudar a possibilidade de generalizar os resultados, fazendo ensaios com outros tipos de polímeros e faixas de concentração maiores, inclusive tentando obter a A.M.R.A. Para uma melhor compreensão da estrutura do escoamento turbulento (com e sem adição de polímeros) vamos projetar uma bancada experimental específica para estes fins, com a utilização de sistemas de Anemometria Laser para medição da velocidade etc.

ANEXOS

ANEXO I

Equações Básicas da Turbulência.

Nos últimos anos muitos autores tem tentado definir a turbulência, conceito este que tem se aperfeiçoado em função do desenvolvimento das pesquisas, dos instrumentos de medição e técnicas de visualização de escoamentos cada vez mais sofisticados, de softwares e computadores cada vez mais potentes e da própria compreensão da Mecânica dos Fluidos.

Etapas importantes na evolução deste conceito foram os trabalhos de Reynolds no final do século passado, os trabalhos de Taylor e Von Kármán em 1937, a introdução do termo **escala de turbulência**. Um passo relevante foi dado por Tennekes & Lumley quando definiram a turbulência não como um conceito único senão como um grupo de características que devem ter os escoamentos turbulentos. Para uma melhor compreensão de nosso trabalho vamos expor as principais equações da turbulência:

Equação da continuidade.

Partindo da equação de continuidade em forma tensorial para fluido incompressível

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{I.1})$$

e conhecendo que

$$U = \bar{U} + u \quad (\text{I.2})$$

substituindo (I.2) em (I.1) e tomando a média, obtem-se:

$$\frac{\partial(\bar{U} + u)}{\partial x_i} = 0 \quad (I.3)$$

ou seja,

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (I.4)$$

Como resultado final chega-se às Equações de Continuidade para o escoamento médio (I.5) e para o escoamento flutuante (I.6) respectivamente. Estas são:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (I.5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (I.6)$$

Equação da Quantidade de Movimento.

Partindo da equação de Navier-Stoke na forma tensorial para um fluido incompressível, tem-se que:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (I.7)$$

tomando-se a média do segundo termo do primeiro membro da equação (I.7):

$$\overline{\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}} = \overline{\rho (U_j + u_j) \frac{\partial (U_i + u_i)}{\partial x_j}} \quad (I.8)$$

considerando as propriedades dos vetores, este termo pode-se expressar como:

$$\overline{\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}} = \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \overline{\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} \quad (\text{I.9})$$

agora tomando-se as médias do primeiro e segundo termo de (I.7), resulta:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = \frac{\partial (\bar{P} + \bar{p})}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} \quad (\text{I.10})$$

e

$$\overline{\mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j}} = \overline{\mu \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial (U_i + u_i)}{\partial x_j}}$$

portanto

$$\mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} = \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{I.11})$$

considerando o processo estacionário e substituindo as equações (I.9), (I.10) e (I.11),

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \overline{\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (\text{I.12})$$

ainda sabemos que:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} - u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j}$$

sendo

$$u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

tomando-se a média:

$$\overline{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = \overline{\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}}$$

substituindo este resultado na equação (I.12), obtem-se:

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (\text{I.13})$$

considerando os seguintes termos,

$$\tilde{\tau}_{ij} = \overline{\Sigma}_{ij} + \sigma_{ij}$$

sendo que $\overline{\tau}_{ij} = 0$

$$\overline{\Sigma}_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\mu S_{ij}$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu s_{ij}$$

Deve-se lembrar que $\delta_{ij} = 1$ se $i = j$ e $\delta_{ij} \neq 0$ se $i \neq j$. Como

$$\overline{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.14})$$

a equação (I.13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P\delta_{ij} + 2\mu S_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})$$

ou ainda

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\Sigma_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (\text{I.15})$$

como a tensão total média do escoamento turbulento vale:

$$T_{ij} = \Sigma_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} = -P\delta_{ij} + 2\mu S_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}$$

resulta então

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij}) \quad (\text{I.16})$$

Portanto a análise da equação de Navier-Stoke aplicada ao escoamento turbulento mostra que a grande diferença é o aparecimento do termo:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j}$$

ou seja, as chamadas tensões de Reynolds. Decompondo a equação da Quantidade de Movimento em três direções temos um sistema de quatro equações, com a equação de continuidade, cujas incógnitas são:

- i) três componentes da velocidade U_i ,
- ii) uma componente da pressão p ,

iii) as componentes das tensões de Reynolds seguintes:

$$\overline{\rho u_1 u_2}, \overline{\rho u_2 u_3}, \overline{\rho u_3 u_1}, \overline{\rho u_1^2}, \overline{\rho u_2^2}, \overline{\rho u_3^2}$$

Isto significa um total de 10 incógnitas e quatro equações, resultando 6 incógnitas adicionais. Na literatura técnica este é o chamado problema de "fechamento da turbulência".

Equação da Energia Cinética.

Na análise da energia cinética é importante assinalar que esta é extraída do escoamento médio pelas grandes escalas dos vórtices e que este ganho é aproximadamente balanceado pela dissipação viscosa da energia nas escalas muito pequenas, levando essa idéia à questão de transferência de energia através de uma cascata de vórtices.

Multiplicando a equação (I.16) por U_i , resulta:

$$U_i U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = U_i \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{T_{ij}}{\rho} \right) \quad (\text{I.17})$$

sendo o termo

$$U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{U_i U_i}{2} \quad (\text{I.18})$$

resultando

$$\rho U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} U_i U_i \right) = U_i \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij} U_i) - T_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (\text{I.19})$$

considerando a simetria do último termo do membro direito de (I.19), a equação fica:

$$T_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} T_{ij} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) = T_{ij} S_{ij} \quad (I.20)$$

substituindo (I.20) em (I.19), resulta:

$$\rho U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} U_i U_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} (T_{ij} U_i - T_{ij} S_{ij}) \quad (I.21)$$

como

$$T_{ij} S_{ij} = 2\mu S_{ij} S_{ij} - \rho \overline{u_i u_j} S_{ij} \quad (I.22)$$

então substituindo esse termo e o valor de T_{ij} na equação (I.19) resulta:

$$U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} U_i U_i \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\frac{P}{\rho} U_j + 2\nu U_i S_{ij} - \overline{u_i u_j} U_i \right) - \dots$$

$$\dots - 2\nu S_{ij} S_{ij} + \overline{u_i u_j} S_{ij} \quad (I.23)$$

que é a Energia Cinética para o escoamento médio. Interpretando-se os termos dessa equação tem-se que:

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{P}{\rho} U_j \right) \quad \text{Trabalho de deformação devido à pressão.}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu U_i S_{ij}) \quad \text{Transporte de energia do escoamento médio pelas tensões viscosas.}$$

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j S_{ij}})$$

Transporte de energia do escoamento médio pelas tensões turbulentas.

$$-2\nu \overline{S_{ij} S_{ij}}$$

Dissipação viscosa.

$$\overline{u_i u_j S_{ij}}$$

Produção turbulenta.

Quando o valor de $Re \gg 1$, o termo de transporte de energia pelas tensões turbulentas é muito maior do que o termo de transporte pelas tensões viscosas.

Da mesma forma que para o escoamento médio, seguindo os mesmos passos só que para valores instantâneos da velocidade obtém-se a equação seguinte que representa a energia cinética das flutuações da velocidade.

$$U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{u_i u_j} \right) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \overline{u_j p} + \frac{1}{2} \overline{u_i u_i u_j} - 2\nu \overline{u_i S_{ij}} \right) - \dots$$

$$\dots - \overline{u_i u_j S_{ij}} - 2\nu \overline{S_{ij} S_{ij}} \quad (I.24)$$

Nesta equação os termos tem os seguintes significados:

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{\rho} \overline{u_j p} \right)$$

Trabalho de deformação devido às flutuações de pressão.

$$-\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{u_i u_i u_j} \right)$$

Transporte de energia de escoamento flutuante pelas tensões turbulentas.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (2\nu \overline{u_i S_{ij}})$$

Transporte de energia do escoamento flutuante pelas tensões viscosas.

$-\overline{u_i u_j S_{ij}}$ Termo de produção de turbulência pelas flutuações.

$-2\nu \overline{s_{ij} s_{ij}}$ Termo da dissipação viscosa das flutuações.

Quando o valor de $Re \gg 1$, $\overline{s_{ij} s_{ij}} \gg S_{ij} S_{ij}$, portanto a dissipação viscosa das flutuações é muito mais intensa que a do escoamento médio.

Equação da vorticidade.

A vorticidade é um elemento importante na compreensão da dinâmica da turbulência. Os escoamentos turbulentos são definidos por um alto nível de vorticidade. Ela é originada nas fronteiras sólidas do escoamento pois não pode ser criada ou destruída no interior do escoamento.

Empregando a decomposição de Reynolds para a vorticidade:

$$\tilde{\omega}_i = \Omega_i + \omega_i \quad (\text{I.25})$$

sendo que $\overline{\omega} = 0$.

Considerando o esquema de um vórtice num sistema cartesiano triortogonal as equações da vorticidade do escoamento médio e das flutuações com o significado de seus termos ficam da seguinte forma respectivamente:

$$\begin{aligned} U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \Omega_i \Omega_i \right) &= - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Omega_i \overline{\omega_i u_j} \right) + \overline{u_j \omega_i} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} + \Omega_i \Omega_j S_{ij} + \dots \\ &\dots + \Omega_i \overline{\omega_j s_{ij}} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{1}{2} \Omega_i \Omega_i \right) - \nu \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (\text{I.26})$$

Os termos significam:

$-\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\Omega_i \omega_i u_j})$ é a transferência da vorticidade média pelas interações turbulentas

(vorticidade, velocidade etc).

$\overline{u_j \omega_i} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j}$ é a produção turbulenta.

$\overline{\Omega_i \Omega_j S_{ij}}$ é o termo de esticamento ou encolhimento dos vórtices pelas tensões de deformação do escoamento médio.

$\overline{\Omega_i \omega_i s_{ij}}$ é o termo da amplificação ou atenuação pelo esticamento das componentes de flutuação pelas tensões médias.

$\nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{\Omega_i \Omega_i} \right)$ é o termo de transferência viscosa.

$-\nu \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j}$ é o termo de dissipação.

A equação para as flutuações fica:

$$\begin{aligned} U_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{\omega_i \omega_i} \right) = & -\overline{u_j \omega_i} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i \omega_i \omega_i}) + \overline{\omega_i \omega_j s_{ij}} + \overline{\omega_i \omega_j S_{ij}} + \dots \\ & \dots + \overline{\Omega_j \omega_i s_{ij}} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{\omega_i \omega_i} \right) - \nu \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (I.27)$$

Os termos significam

$\overline{u_j \omega_i} \frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j}$ é o gradiente do termo de produção (troca de vórtices entre as equações de $\Omega_i \Omega_i$ e $\omega_i \omega_i$).

$-\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_j \omega_i \omega_i})$ é o termo de transporte de vorticidade pelas flutuações turbulentas da velocidade.

$\overline{\omega_i \omega_j S_{ij}}$ é o termo de produção da média quadrática da vorticidade pelo alongamento turbulento.

$\overline{\omega_i \omega_j S_{ij}}$ é o termo de produção de vorticidade turbulenta pelo alongamento devido às tensões médias.

$\overline{\Omega_j \omega_i S_{ij}}$ é o termo misto de produção.

$\nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} \left(\frac{1}{2} \overline{\omega_i \omega_i} \right)$ é o termo de transferência viscosa.

$-\nu \left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \omega_j}{\partial x_i} \right)$ é o termo de dissipação viscosa.

ANEXO II-A.

Metodologia para o cálculo do perfil de velocidade adimensionalizado.

Dados fixos para os cálculos:

D diâmetro da tubulação.

L comprimento da seção de testes.

g aceleração da gravidade.

Propriedades físicas do solvente e da solução polimérica.

Equações de cálculo.

a) Fator de velocidade, F_v .

$$F_v = \frac{1}{n} \frac{\sum \sqrt{\Delta h_i}}{\sqrt{\Delta h_c}} \quad (\text{II.A.1})$$

sendo

n: o número de leituras (pontos de medições, 10 para este caso),

Δh_i : valor da leitura do tubo de Pitot em cada ponto da seção,

Δh_c : valor da leitura do tubo de Pitot para o ponto central ($y=50$ mm).

A determinação deste valor deve ser feita não pelos valores obtidos diretamente nas medições, senão através de valores corrigidos levando em consideração as variações na área devido à introdução do tubo de Pitot na seção de testes.

b) Cálculo da constante global de correção, k.

$$k = F_v \cdot A \quad (\text{II.A.2})$$

A é a área de testes.

c) Cálculo da velocidade no ponto central, V_c .

$$Q = k \cdot V_c$$

$$V_c = \frac{Q}{k} \quad (\text{II.A.3})$$

d) Cálculo da constante do aparelho (tubo de Pitot), C.

$$u = C \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (\text{II.A.4})$$

O cálculo é feito para as seguintes condições ;
 $\Delta h = \Delta h_c$ e $V = V_c$, ou seja, para as condições no eixo da tubulação, então fica:

$$C = \frac{V_c}{\sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_c}} \quad (\text{II.A.5})$$

e) Cálculo do coeficiente de atrito, f.

Considerando tubulações lisas, pode-se calcular o valor de f, por exemplo, a partir da equação de Prandtl (ou de escoamento hidraulicamente liso).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad (\text{II.A.6})$$

ou a equação de Colebrook para tubulações lisas;

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}}\right) \quad (\text{II.A.7})$$

f) Cálculo da queda de pressão na seção, ΔP .

Aplicando a equação de Darcy entre as seções inicial e final da tubulação de acrílico obtém-se:

$$\Delta P = \left(\frac{f \cdot L \cdot \langle U \rangle^2}{2 \cdot D \cdot g} \right) \gamma \quad (\text{II.A.8})$$

sendo

$\langle U \rangle$ a velocidade média na seção e γ é o peso específico.

A velocidade média determina-se pela equação de continuidade

$$\langle U \rangle = \frac{Q}{A} \quad (\text{II.A.9})$$

g) Cálculo da tensão de cisalhamento na parede, τ_w .

Aplicando a equação da quantidade de movimento a um volume de controle, que coincida com o volume interior da tubulação entre as seções de teste, obtém-se:

$$\tau_w = \frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot L} \quad (\text{II.A.10})$$

g-1) Cálculo da velocidade de atrito, u_* .

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{II.A.11})$$

ρ é a densidade, a qual no caso das soluções poliméricas vai ser considerada como igual a da água.

h) Cálculo dos adimensionais, U^+ e Y^+ .**h-1) Velocidade adimensional, U^+ .**

$$U^+ = \frac{u}{u_*} \quad (\text{II.A.12})$$

sendo u a velocidade média local no ponto y da seção, (II.A.5).

h-2) distância adimensional, Y^+ .

$$Y^+ = \frac{u_* \cdot y}{\nu} \quad (\text{II.A.13})$$

Uma vez obtidos os pares de pontos U^+ e Y^+ plotam-se estes no correspondente gráfico lembrando que ambos eixos estão em coordenadas logarítmicas.

ANEXO II-B.

Metodologia para a cálculo dos pares de pontos f e Re .

Dados fixos para os cálculos:

D diâmetro da tubulação.

L comprimento da seção de testes.

Propriedades físicas do solvente e da solução polimérica.

Equações de cálculo.

a) Cálculo do número de Reynolds, Re .

$$Re = \frac{\langle U \rangle \cdot D}{\nu} \quad (\text{II.B.1})$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido. Para o caso da solução polimérica considerou-se como sendo água. No caso do solvente é calculado como uma função da temperatura.

A velocidade média determina-se pela equação de continuidade

$$\langle U \rangle = \frac{Q}{A} \quad (\text{II.B.2})$$

b) Cálculo do coeficiente de atrito, f .

Aplicando a equação de Darcy entre o início e o final de seção de testes (tubulação de P.V.C), e isolando f :

$$f = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot D}{\rho \cdot L \cdot \langle U \rangle^2} \quad (\text{II.B.3})$$

o termo ΔP é obtido mediante a leitura (ΔH) nos transdutores de pressão da instalação e ρ é a densidade do solvente ou da solução polimérica. Para ambos casos considera-se a mesma.

c) Cálculo do coeficiente da Eficiência da Redução de Atrito, ψ .

$$\psi = \frac{|f_s - f_p|}{f_s} \times 100 \quad (\text{II.B.4})$$

sendo

f_s o fator de atrito para o solvente,

f_p o fator de atrito para a solução polimérica.

Os dois valores são obtido para um mesmo valor de Re.

Com os pares de pontos f e Re plotam-se estes no gráfico lembrando que ambos eixos devem estar em coordenadas logarítmicas.

ANEXO III



Foto (III.1) Vista lateral da seção de teste 1. Observe-se em primeiro plano a tomada de pressão e à direita o transdutor de pressão.



Foto (III.2) O transdutor de pressão. Observe-se à esquerda as conexões às tomadas de pressão e a direita (cabo preto) a conexão ao sistema de aquisição de dados.



Foto (III.3) Transdutor de pressão nas seções 1 e 2.

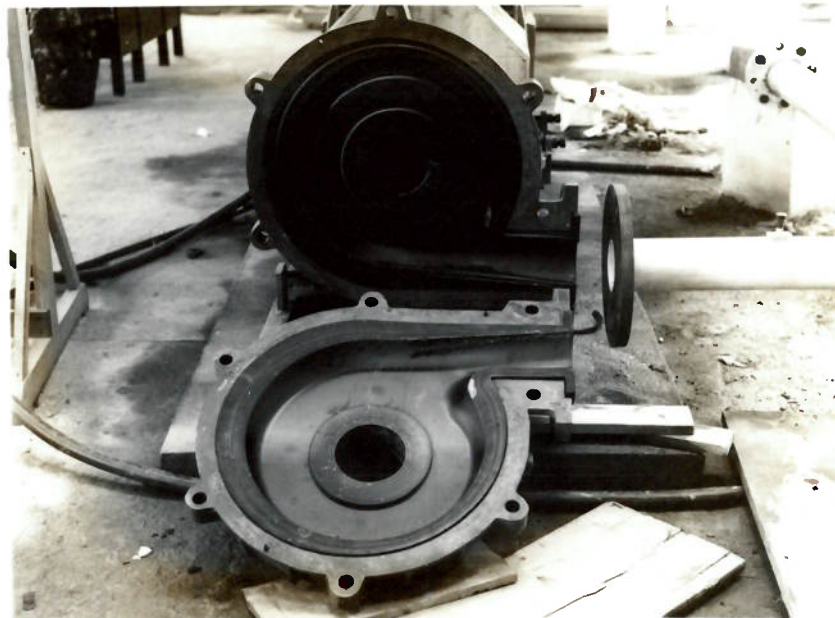


Foto (III.4) Vista Geral da bomba centrífuga desmontada.

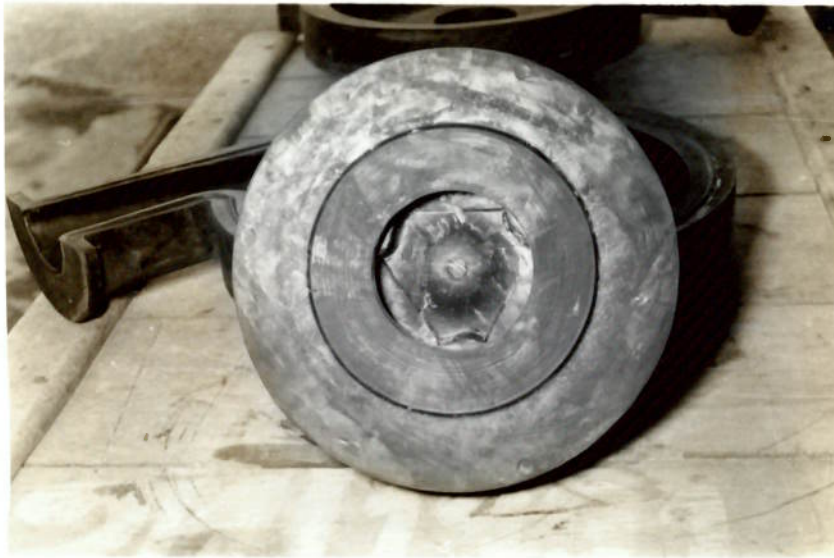


Foto (III.5) Rotor da bomba revestido com borracha natural para evitar desgaste por erosão.

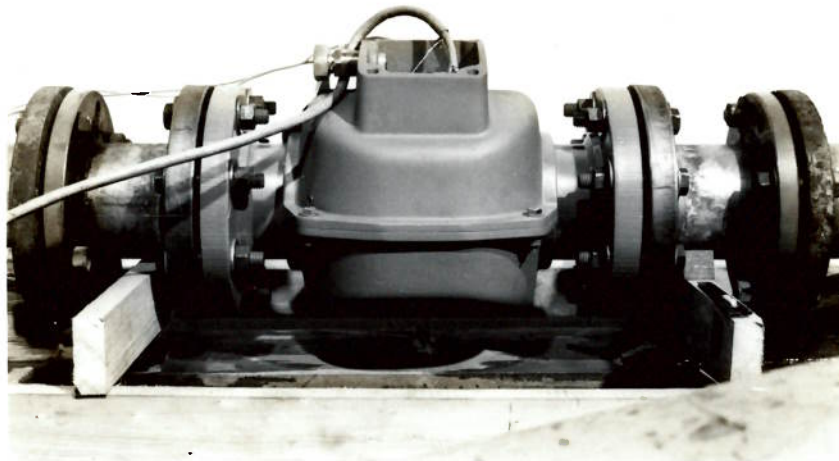


Foto (III.6) Medidor eletromagnético de vazão.

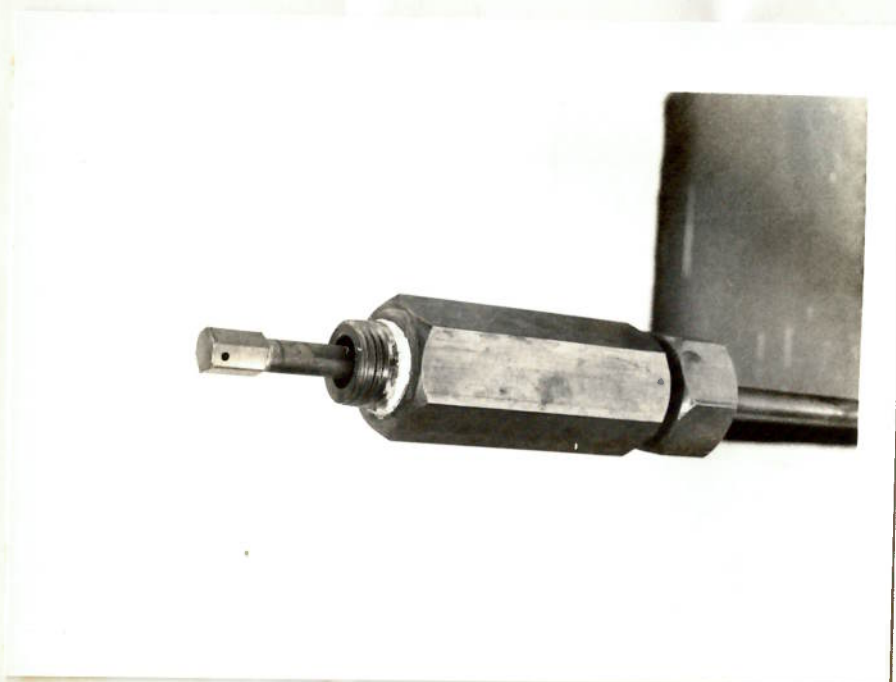


Foto (III.7) Vista Geral do Tubo de Pitot.

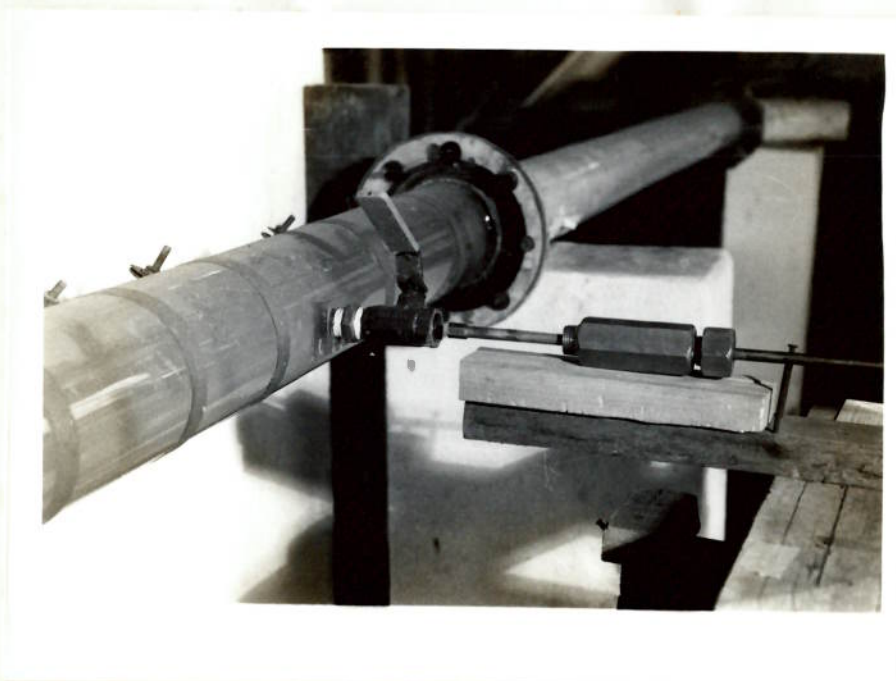


Foto (III.8) Vista da seção de ensaios 3, para medição do perfil de velocidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Berman,N.S. **Drag reduction of the highest molecular weight fractions of poly(ethylene oxide).** The PHYS FLUID, v.20, n 5, May 1977.
- Berman,N.S. **Annual Reviews of Fluid Mechanics V 10,** Annual Reviews Inc., Palo Alto California, 1978.
- Carnahan,B. **Applied numerical methods.** New York, John Wiley, 1969, 604 p.
- Chason, Hubert, Qiao & Gaolin. **Drag Reduction in hidraulic flows.** Procc. of Hydraulic Working with the Environment National Conference. p. 123-128. 1994.
- Coiado,E.M **Redução da energia consumida por uma instalação de recalque mediante a adição de polímeros.** Trabalho apresentado para o Concurso de Livre Docência. Limeira. 1989.
- Daily,J.W & Harleman,D.R.F **Dinâmica de los Fluidos con aplicaciones en la ingeniería** 2a ed. México. Trillas, 1969. 511 p.
- Dodge,D.W **American Institute of Chemical Engineering Journal** v. 5, EUA, 1959.
- Domingos,S. **Redução de arrasto em condutos por adição de polímeros e sua aplicação às adutoras de água bruta.** Dissertação apresentada à EPUSP para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientador: Prof. Dr. Tufi Mamed Assy. São Paulo, 1994.

- Dust,F. & Rastogi,A.K **Calculations of turbulent boundary layer flows with drag reducing polymer additives.** The PHYS FLUID, v.20, n 12, Dec 1977.
- Elata,C. **Turbulent shear flow of polymer solution** Israel J. Tech., v. 4, pp 87, 1966.
- Fabula,A.G **Fire-fighting benefits of polymeric friction reduction.** J Basic Eng, Trans. A.S.M.E., 93D, p 453, 1971.
- Frisch,U. & Orszag,S.A **Turbulence: Challenges for theory and experiment.** PHYS TODAY, p.24-32, Jan. 1990.
- Galego,N. **Química-física de los polímeros.** Habana, C.T, 1977. p. 195-206.
- Gu, Peiyun, Wang, Changfa and Li. **Studies on drag reduction characteristics of viscoelastic polyacrilamide solution.** Polymeric Materials Science and Engineering v. 9, n. 1, p. 47-52, Jan. 1993.
- Gustavsson,L.H **Drag reduction experiments with polystyrene with some implications for mean velocity profile.** The PHYS FLUID, v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.
- Hattori, Hirotsugu, Yamauchi and Tomoo. **Turbulent drag reduction in a dilute polymeric solution flowing through a fiber-implanted circular pipe.** Journal Chemical of Engineering of Japan. v.21, n. 4, p. 441-443, Aug. 1989.

Hinch,E.J. **A note on the mechanism of the instability at the interfase between two shearing fluids.** J FLUID MECH, v.144, p.463-465, 1984.

Hinze,J.O. **Turbulence.** 2a ed., New York, McGraw-Hill, 1975, 760 p.

Hoyt,J.W.,**The effect of additives on fluid friction.** J. of Basic Engng., Trans. ASME, Series D, 94, pp. 258-285. 1972.

Jubran, Bassan,A., Handan, Mansour and Mohammed. **Some experimental aspects of drag reduction in thermoplastic pipes.** Polymer-Plastic Techonology and Engineering. v. 31, n. 3-4, p. 259-269, 1992.

Jubran, Bassam,A., Mansour and Awad. **Drag Reductions by a chemical additive in a rectangular open channel.** International Journal of Engineering Fluid Mechanics. v. 5, n. 3, p. 249-263, 1992.

Kolh,M.C **Energy storage in drag-reducing polymer interface.** Journal of polymer Science, v 11, p 953-971, 1973.

Kolar,V. et al. **Experiments with a drag reducing polymer in an ash-slag hydrotransport pipeline.** J. HYDR. RES., v.26, n.2, p. 143-158, 1988

Landahl,M.T **Dinamic of the boundary layer turbulence and the mechanism of drag reduction.** The PHY. FLUID., v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.

Little, Ralph, Smidt and Huang. **Improved drag reduction by control of polymer**

particle size. Industrial & Engineering Chemistry Research. v.30, n.2, p. 403-407, feb. 1991.

Lodes,A. and Macho, V. **Influence of polyvinylacetate aditive in water on turbulent velocity field and drag reduction.** Experiments in Fluid. p. 383-387, 1989.

Lumley,J.L. **Drag reduction in two phase and polymer flow.** The PHYS. FLUID., v.20 n.10, Pt II, Oct 1977.

Mashkov,S.L. **Calculation of turbulent friction on a plate with distributed injection of polymer solution into the boundary layer.** Izvestiya Akad Nauk, Kaluta, URSS. v. 26, n. 2, p. 295-297. Sep. 1992.

McAndrew,T., Page, Miller and Susan, A. **Reduction of aqueous fluid drag with poly(vinylamine).** Polymeric Materials Science and Engineering. v. 62, n. 3, p. 195-196 1993.

McComb,W.D. & Chan, K.T.J. **Laser-doppler anemometer measurements of turbulent structure in drag reducing fibre suspensions.** J.FLUID.MECH., v .152, p.455-478, 1985.

Mysels, W.A. **Flow of thickened fluid** U.S Patent, 2,492,173, Dec. 27 1949.

Nakae,T. **Bancada de ensaio para o estudo do escoamento da mistura água-sólido em condutos forçados.** Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientador: Prof. Dr. Giorgio Brighetti. São Paulo,

1990. 152 p.

Nakae, T. **Influência dos sedimentos finos na redução de arrastre em escoamento de areia em condutos forçados.** Tese apresentada à EPUSP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Orientador: Prof. Dr. Giorgio Brighetti. São Paulo, 1994, 2v.

Nekrasov, B. **Hidráulica.** Habana, Pueblo y Educación, 1980.

Ortiz, J.P. **Estrutura e resolução de pressões flutuantes - sua análise randômica na base do ressalto hidráulico.** Tese apresentada à EPUSP, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Raffaele Cuomo e Coorientador Prof. Dr. Cesar Farell. São Paulo, 1989, 2v.

Petterson, J.P. & Zakiin, J.L. **High polymer drag reduction in open channel flow** AIChE, Symposium Series, v. 130, n. 69, pp 82-86, 1973.

Petterson, G.K., Chosnek, J. & Zakin, J.L. **Turbulent structure in drag reducing polymer solutions.** The PHYS.FLUID, v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.

Rabinovich, E.Z. **Hidráulica.** Moscú, Ed. Mir, 1987.

Ram, A. **Reduction of friction in oil pipelines by polymer additives** Ind. Chem. Des Dev. v. 6, n.3, pp 309-313, July 1967.

Schlichting, H. **Boundary-layer theory.** 7a ed., New York, McGraw-Hill, 1979.

Scrivener, O. & Koop, C. **Influence of polymer solutions on the structure of turbulence in a pipe.** The PHYS.FLUID, v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.

Sellin, R.H.J., Hoyt, J.W. & Scrivener, O. **The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part I, Basic aspects.** J.HYDR.RES., V.20, n.1, p. 29-64, 1982.

Sellin, R.H.J., Hoyt, J.W., Pollert, J. & Scrivener, O. **The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part II, Present application and future proposals.** J.HYDR.RES., v.20, n. 1, p. 235-293, 1982.

Shaver, R.G. & Merrill, E.W. **American Institute of Chemical Engineering Journal** v.5, EUA, 1959.

Stenberg, L., Langersted, T. & Lindgren, E.R. **Polymer additives mixing and turbulent drag reduction.** The PHYS.FLUID., v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.

Stupin, A.B. **Semiempirical theory of drag reduction.** Fluid Mechanics Soviet Research, v. 19, n. 5, p. 104-114, Sep.-Oct. 1991.

Tam, K.C., Tiu, C. & Keller, R.J. **A general correlations for turbulent velocity profiles of dilute polymer solutions.** J.HYDR.RES., v. 30, n 1, pp 117, 1992.

Tennekes, H. & Lumley, J.L. **A first course in turbulence.** Massachusetts, M.I.T Press, 1972, 299 p.

Tomita, Yukio, Yokoyama, Toshio, Usami & Shin. **Flow of dilute polymer solutions in a two dimensional channel.** Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu. v. 53, n. 493, p. 2745-2749 Sep. 1988.

Toms, B.A. **On the early experiments on drag reduction by polymer.** The PHYS.FLUID v.20, n.10, Pt II, Oct 1977.

Toms, B.A. **Proceeding of International Congress on Rheology.** Vol II, p 135, North Holland, Amsterdam, 1949.

Usui, Hiromoto, Kodama and Matsuura. **Laser Dopler measurements of turbulence structure in drag reducing pipe flow with polymer injection.** Journal of Chemical Engineering of Japan, v. 21, n. 2, p. 134-140, Apr. 1988.

Virk, P.S **Drag reduction in rough pipes.** J.FLUID.MECH., v.45, Part 2, p. 225-246, 1965.

Virk, P.S., Merrill, E.W., Mickley, H.S., Smith, K.A. & Mollo-Christensen, E.L. **The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of polymer solutions.** J.FLUID.MECH., V.30, Part 2, p. 305-328, 1967.

Virk, P.S (a) **An elastic sublayer model for drag-reduction by dilute solutions of linear macromolecules.** J.FLUID.MECH., v. 45, Part 3, p. 417-440, 1971.

Walsh, M **Ph D Dissertation.** California Institute Tecnology, California, Pasadena, 1967

Webber, N.B. **Fluid Mechanics for Civil Engineer.** London, E & F.N. Spon, 1969, 340 p.

Willmarth, W.W **Survey and new measurements of turbulent structure near the wall.**

The **PHYS.FLUID.**, v. 20, n. 10, Pt II, Oct 1977.