



**Projeto Final de Graduação**  
Departamento de Engenharia Mecânica

*Redução de Arrasto via Adição de Polímeros*

*Drag Reduction by Polymer Additives*

**Orientador:** Mônica F. Naccache

**Aluno:** Bruno Ribeiro de F. C. Paula

**Data:** Junho 2005

**Área de concentração:** Termociências

# Índice

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| • <b>Lista de caracteres</b> .....                   | 3  |
| • <b>Lista de figuras</b> .....                      | 5  |
| • <b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....               | 7  |
| • <b>Capítulo 2 - Objetivo</b> .....                 | 10 |
| • <b>Capítulo 3 - Estudo bibliográfico</b> .....     | 11 |
| • <b>Capítulo 4 - Aparato experimental</b> .....     | 14 |
| • <b>Capítulo 5 - Metodologia</b> .....              | 19 |
| • <b>Capítulo 6 - Resultados experimentais</b> ..... | 24 |
| • <b>Capítulo 7 - Conclusões</b> .....               | 34 |
| • <b>Agradecimentos</b> .....                        | 36 |
| • <b>Referências bibliográficas</b> .....            | 37 |

## Lista de Caracteres

- $Q$  - Vazão volumétrica.
- $V$  - Velocidade do fluido no interior do tubo.
- $Re$  - Número de *Reynolds*.
- $n$  - Índice exponencial.
- $\dot{\gamma}$  - Taxa de cisalhamento.
- $\eta$  - Viscosidade do fluido.
- $\Delta p$  - Diferença de pressão.
- $f_{exp}$  - Fator de atrito experimental.
- $f_{teo}$  - Fator de atrito teórico.
- $\rho$  - Densidade do fluido.
- $g$  - Força da gravidade.
- $\alpha$  - Coeficiente de energia cinética.
- $z$  - Altura potencial.
- $h_T$  - Perda de carga total.
- $h_d$  - Perda de carga distribuída.
- $h_l$  - Perda de carga localizada.
- $f$  - Fator de atrito.
- $L$  - Comprimento da tubulação.
- $D$  - Diâmetro interno da tubulação.

- $k$  – Índice de consistência.

## Lista de Figuras

- **Figura 1** - Vista superior do aparato experimental. Os X's mostrados no esquema equivalem às válvulas instaladas no conjunto.
- **Figura 2** - Coletor de dados *Agilent 34970<sup>A</sup>*
- **Figura 3** - Medidor da diferença de pressão *Validyne*.
- **Figura 4** - Bomba trifásica rotativa de 1/2cv *CAM-W4-NE*.
- **Figura 5** - Inversor de frequências.
- **Figura 6** - Tubulação conectada ao tanque.
- **Figura 7** - Vista frontal do aparato.
- **Figura 8** - Esquema do fluido se desenvolvendo no interior de um tubo.
- **Figura 9** - Resultado do teste experimental realizado com água pura.
- **Figura 10** - Queda da viscosidade com a taxa de cisalhamento.
- **Figura 11** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,25g/L.
- **Figura 12** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,50g/L.
- **Figura 13** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,75g/L.
- **Figura 14** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 1,0g/L.
- **Figura 15** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 2,0g/L.
- **Figura 16** - Comparação entre todos os resultados encontrados.
- **Figura 17** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.

- **Figura 18** - Comparação da redução de arraste para diferentes soluções.
- **Figura 19** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.
- **Figura 20** - Resultados utilizando outros polímeros em soluções salinas.
- **Figura 21** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.

# Capítulo 1

## Introdução

O fenômeno de redução de arraste consiste na diminuição da resistência da fricção interna das partículas de um líquido em movimento através da utilização de aditivos durante o escoamento em regime turbulento. Esses aditivos redutores de arrasto são moléculas de polímeros com alto peso molecular, surfatantes, sabões, fibras e outras misturas. Essas substâncias quando adicionadas em pequena quantidade ao fluido, podem reduzir drasticamente a intensidade do fluxo turbulento fazendo com que os fluidos ofereçam uma resistência menor ao escoamento. Como consequência disto, há uma melhoria considerável no bombeamento do fluido. As moléculas de polímero mais ativas para essa finalidade são as que apresentam cadeias compridas lineares ou com pouca ramificação. Por exemplo, as moléculas de poli(óxido de etileno), polisobutileno e poliacrilamida cuja razão entre o comprimento da cadeia polimérica e sua largura está na faixa de  $10^4$  a  $10^5$ .

Uma dado importante do fenômeno da redução de arraste é a de que a quantidade de aditivo necessária é, em geral, muito pequena. Essa característica implica em duas importantes vantagens que são: a viabilização econômica da utilização de aditivos, mesmo tendo em vista que o preço de aditivos comerciais disponíveis atualmente é excessivamente alto; e o fato das principais propriedades termofísicas e reológicas dos líquidos não serem geralmente afetadas pela presença, em baixíssima concentração, do aditivo. Recentemente, aditivos produzidos pela *Conoco Inc.* (“CDR”) e *Chemilink Petroleum Inc* (“FLO”) reduziram efetivamente o arraste na faixa de 20% a 56% durante o transporte de petróleo, em concentrações variando de 10 a 100 ppm.

O estudo deste fenômeno tem grande atratividade do ponto de vista de engenharia, em virtude da potencial diminuição de custos operacionais de processos. Por exemplo, é possível

reduzir potências de bombeamento de água em cinquenta por cento ou mais, através da introdução de quantidades extremamente pequenas de certos polímeros, e reduções da mesma ordem também se observam em escoamentos de petróleo por exemplo. Do ponto de vista científico, o problema envolve grandes desafios na pesquisa básica em mecânica dos fluidos. Como pequenas alterações na composição do líquido modificam dramaticamente o comportamento do escoamento turbulento, pode-se concluir que os aditivos alteram um importante mecanismo de transporte turbulento. Embora o efeito seja conhecido desde o fim da década de 40, o mecanismo físico que causa a redução de arraste ainda não é inteiramente conhecido, e existem algumas teorias apresentadas na literatura indicando que diversos fatores podem estar relacionados à redução de arraste. Durante estas seis décadas de pesquisa, muita informação sobre o fenômeno foi gerada. Em particular, a maioria dos estudos se concentrou nos escoamentos em tubos, por causa de sua grande importância prática. Por outro lado, uma grande quantidade de dados tem sido coletada, para tornar possível a formulação de modelos fenomenológicos e correlações semiempíricas, semelhantes às empregadas na representação de escoamentos turbulentos newtonianos, para escoamentos com redução de arraste.

Um problema encontrado relacionado à redução de arraste via adição de polímeros, é a degradação do polímero. A degradação de um polímero é a quebra de sua cadeia principal, e pode ocorrer devido à reação química (degradação química), temperatura (degradação térmica) ou cisalhamento (degradação mecânica). A degradação mecânica é um dos principais obstáculos para a utilização de soluções diluídas de polímero em aplicações de engenharia. As tensões responsáveis por tal degradação são decorrentes de esforços de alongação.

A consequência da degradação polimérica é a redução do peso molecular e modificação de sua distribuição e, conseqüentemente, em suas propriedades. Testes realizados mostram que o grau

de degradação aumenta com o tempo de escoamento do fluido e que as moléculas mais afetadas pela degradação eram aquelas responsáveis pela redução do arraste.

A motivação do presente trabalho está ligada aos custos relacionados a utilização dos redutores de arraste na indústria do petróleo. Comercialmente, já existem aditivos redutores de arraste disponíveis no mercado, sendo que os principais fabricantes são a Continental Oil Co. (Conoco) e a Baker Hughes do Brasil. Todavia, os preços praticados por estas empresas multinacionais, que dominam o mercado, são simplesmente exorbitantes. A política de preços não é baseada no custo do produto, e sim na potencial economia que o produto trará para o comprador. Conseqüentemente, o mesmo produto muitas vezes é vendido a preços totalmente diferentes quando as aplicações são diferentes. Naturalmente, é total o sigilo mantido por essas empresas com relação a qualquer informação técnica sobre seus aditivos. Assim, um estudo de novos produtos, desenvolvidos pelas próprias empresas que o utilizam, como a Petrobrás, é essencial para uma possível redução dos custos envolvidos no uso de redutores de arraste.

## **Capítulo 2**

### **Objetivo**

O objetivo do presente Projeto é fazer uma análise do desempenho de diferentes polímeros propostos para serem utilizados como redutores de arraste. Para isso, serão realizadas medidas experimentais de vazão e perda de carga no interior de um tubo circular, para diferentes fluidos.

## Capítulo 3

### Estudo Bibliográfico

Como já foi comentado na Introdução do presente Projeto, o fenômeno da redução de arraste devido à adição de polímeros, vem sendo extensivamente investigado na literatura. Até o presente momento não se chegou a conclusões definitivas sobre o fenômeno, mas existem algumas teorias que apresentam possíveis causas para a redução de arraste no escoamento turbulento devido à inclusão, em pequenas quantidades, destes aditivos denominados “redutores de arraste”. Este fenômeno seria primeiramente descoberto por Toms em 1940. Com o passar dos anos esse fenômeno recebeu atenção especial devido a sua importância nas suas várias aplicações. Na verdade, a redução de arraste seria obtida devido a uma laminarização do escoamento turbulento (Kostic, 1994). Esta laminarização por sua vez, pode ser causada pelo alongamento dos vórtices ou por uma redução ou extinção da produção turbulenta. Ainda segundo Kostic (1994), embora as instabilidades em grandes escalas ocorram, a principal parcela de turbulência (pequenas escalas) é que são consideravelmente eliminadas pelos aditivos redutores de arraste. Kawaguchi et al. (2002) mostram em visualizações experimentais que a penetração que ocorre da região de baixas velocidades nas de alta, em escoamentos de água pura, e que é um dos principais geradores de energia turbulenta, deixa de acontecer quando redutores de arraste são adicionados. Além disso, seus resultados comprovam também uma redução da flutuação de vorticidade em regiões próximas das paredes. Sureshkumar e Beris (1996) também mostram que a inclusão de polímeros induz várias alterações na estrutura turbulenta no escoamento em canais. Os resultados, obtidos a partir de simulação numérica direta, mostram também decréscimo nas flutuações de vorticidade e inibição na geração de energia turbulenta. Orlandi (1995), Renardy (1995), Yarin (1997), Gyr e Tsinober (1997) também discutem

a influência dos parâmetros reológicos nos fenômenos causadores da redução de arraste, descritos acima. Choi (2000) faz uma análise dos desenvolvimentos recentes na Europa, relacionados à redução de arraste e apresenta alguns mecanismos físicos envolvidos no problema. Phan-Thien e Dou (1999) fornecem resultados numéricos que mostram que tanto o cisalhamento quanto as tensões normais, contribuem para o fenômeno da redução de arraste. Liberatore et al (2003) analisam o fenômeno da formação de estruturas cisalhantes, e mostram que elas podem ter influência significativa na redução de arraste. Dimitropoulos et al. (2001) mostra numérica e experimentalmente que o aumento na elasticidade da solução leva a uma redistribuição da energia cinética turbulenta. Em outro trabalho, Dimitropoulos et al. (1998) analisa o efeito de propriedades reológicas na redução de arraste, e obtém um número de Weissenberg crítico, a partir do qual o fenômeno da redução de arraste se inicia. O efeito do número de Weissenberg na redução de arraste é também investigado por outros autores (Yu e Kawaguchi, 2003 e Larson, 2003). Kalashnikov (1998) analisa o efeito de outros parâmetros reológicos, e propõe algumas correlações empíricas, que descrevem a redução de arraste numa forma adimensional. Pereira e Pinho (2002) analisam a influência do escoamento e da reologia de polímeros na redução de arraste. Escudier e Smith (2000) obtêm resultados experimentais em dutos de seções quadradas, que indicam reduções substanciais nos níveis de intensidade turbulenta e nas tensões de *Reynolds*. Aguilar et al. (2001) obtêm resultados assintóticos para os valores máximos de redução de arraste e de troca de calor com a adição de surfactantes, e verificam que a razão entre estes valores é constante, e independe do *Número de Reynolds*. Gasljevic et al. (1999b) comparam os parâmetros de redução de arraste e de troca de calor com os de redução de turbulência. Em outros trabalhos, Gasljevic et al. (1999a e 2001) analisam a influência do diâmetro das tubulações na redução de arraste. Eles mostram que quando não há degradação do polímero, o diâmetro não tem influência na redução de arraste. Kim et

al. (2002) e Kalashnikov (2002) investigam a influência da degradação das moléculas poliméricas na redução de arraste, observando que a eficiência na redução de arraste cai com a degradação dos polímeros.

## Capítulo 4

### Aparato Experimental

Para a realização dos testes, um loop foi construído com o objetivo de podermos medir as vazões, os fatores de atrito e as perdas de carga em escoamentos através de dutos de seção reta circular.

#### Para a construção do loop foram utilizados:

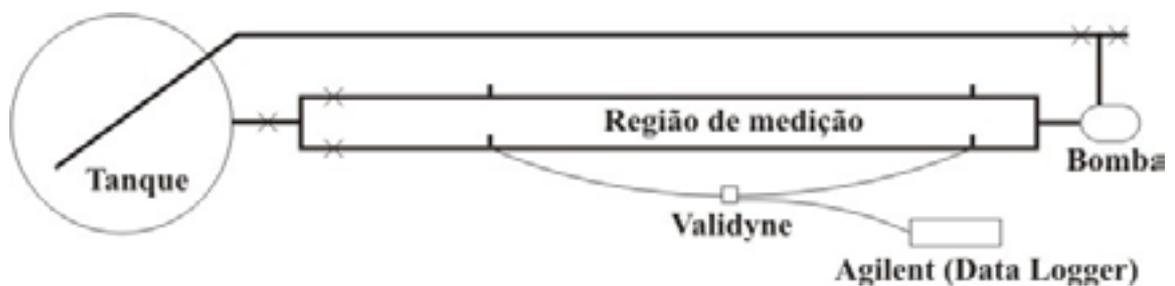
- tubos PVC (incluindo joelhos, T's e redutores) de 1/2" e 1/4".
- válvulas tipo esfera.
- bomba rotativa trifásica de 0.5cv *CAM-W4-NE*.
- inversor de frequências.
- tanque de 300 litros.

#### Para a aquisição de dados:

- *Validyne CD23*.
- Coletor de dados *Agilent 34970A*.
- PC.

A tubulação foi conectada ao tanque e bifurcada em dois caminhos com diferentes diâmetros (1/2" e 1/4"). Essa é a região onde as medidas de queda de pressão foram coletadas pelo *Validyne*. Conectado ao *Validyne*, temos o *Agilent 34970A* que nos retorna os valores com uma maior precisão e onde podemos acompanhar o comportamento do fluido através de gráficos utilizando o programa

*Data Logger*. A bomba foi então conectada após a região de medida, succionando o fluido para evitar uma possível degradação das moléculas dos aditivos. Após a passagem pela bomba o fluido tem a opção de sair do loop ou retornar ao tanque. O esquema do aparato está mostrado a seguir:



**Figura 1** – Vista superior do aparato experimental. Os X's mostrados no esquema equivalem às válvulas instaladas no conjunto.

A seguir serão mostradas fotos individuais dos equipamentos e de todo o aparato experimental.



**Figura 2** – Coletor de dados *Agilent 34970A*



**Figura 3** – Medidor da diferença de pressão *Validyne*.



**Figura 4** – Bomba trifásica rotativa de 1/2cv *CAM-W4-NE*.



**Figura 5** – Inversor de frequências.



**Figura 6** – Tubulação conectada ao tanque.



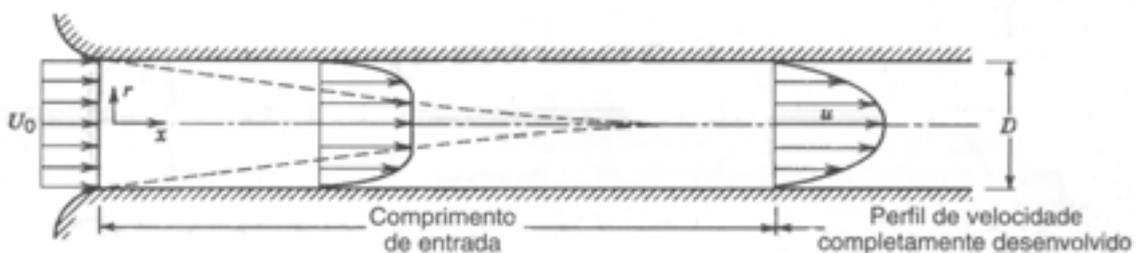
**Figura 7** – Vista frontal do aparato.

## Capítulo 4

### Metodologia

Para a realização dos testes, o loop acima descrito foi construído com o objetivo de podermos medir as vazões, os fatores de atrito e as perdas de carga em escoamentos através de dutos de seção reta circular. O loop possui a opção de ser fechado ou aberto, e cuidadosamente projetado para evitar obstáculos, constrições e outros elementos que possam vir a causar a quebra das macromoléculas em escoamento. As medidas foram realizadas com água e uma mistura água-polímero.

Para obtermos um resultado mais próximo ao real, devemos garantir que o escoamento na região de medida esteja completamente desenvolvido isto é, que a forma do perfil de velocidade não varie mais com o comprimento do tubo (Fig 8). Existe então um comprimento mínimo chamado de *comprimento de entrada* que consiste na distância a jusante, em relação à entrada, até o ponto onde o escoamento é completamente desenvolvido (Fig 8). Para um escoamento turbulento, esse comprimento varia de 25 à 40 vezes o diâmetro de entrada da tubulação. Portanto um comprimento razoável foi deixado para que o escoamento se desenvolva antes da região de medida.



**Figura 8** – Esquema do escoamento no interior de um tubo.

Uma tabela foi construída com os valores de todos os parâmetros necessários para o estudo da redução de arraste:

|   |   |    |   |                |        |         |            |           |           |       |
|---|---|----|---|----------------|--------|---------|------------|-----------|-----------|-------|
| Q | V | Re | n | $\dot{\gamma}$ | $\eta$ | Leitura | $\Delta p$ | $f_{exp}$ | $f_{teo}$ | RA(%) |
|---|---|----|---|----------------|--------|---------|------------|-----------|-----------|-------|

- Q é a vazão volumétrica.
- V é a velocidade do fluido no interior do tubo.
- Re (*Número de Reynolds*)
- n é o índice power-law.
- $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento.
- $\eta$  é a viscosidade do fluido.
- “Leitura” significa o valor da diferença de pressão em volts captado pelo Validyne.
- $\Delta p$  é a diferença de pressão em Pascal. A transformação das unidades é feita através da calibração do Validyne utilizando um manômetro. Lembrando que 1mm de coluna d’água equivale a uma pressão de  $\rho gh$  Pa.
- $f_{exp}$  é o fator de atrito experimental medido para a mistura água-polímero.
- $f_{teo}$  é o fator de atrito teórico para a água pura.
- “RA(%)” significa a diferença entre os dois fatores de atrito (experimental e teórico) isto é, a porcentagem de redução de arraste existente.

Para medirmos a porcentagem de redução de arraste existente, comparamos os fatores de atrito de um fluido sem a adição do polímero redutor ( $f_{teórico}$ ), com os fatores de atrito para o fluido com a mistura polimérica ( $f_{experimental}$ ) para diferentes *Números de Reynolds*.

Neste trabalho a redução de arrasto só será estudada em uma faixa do *Número de Reynolds* compreendida entre 3000 e 12000, que é a faixa utilizada para o bombeamento do fluido de perfuração.

### Equacionamento

Através da equação de conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica) entre dois pontos de uma tubulação e admitindo hipóteses como escoamento permanente, incompressível, energia interna e pressões uniformes através das duas seções e fazendo devidas simplificações, obtemos a seguinte relação:

$$\left( \frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left( \frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) = h_T \quad (1)$$

onde,  $p_1, p_2, V_1$  e  $V_2$  são as pressões e velocidades equivalentes aos pontos 1 e 2,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $g$  é a força da gravidade,  $\alpha$  é o coeficiente de energia cinética,  $z$  a altura potencial e  $h_T$  a perda de carga total..

A perda de carga total é considerada como a soma das perdas distribuídas ( $h_d$ ), devidas aos efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas ( $h_l$ ), devidas a entradas, acessórios, mudanças de área, etc.

Simplificando ainda mais esta equação de acordo com as particularidades do experimento temos:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = g(z_2 - z_1) + h_d \quad (2)$$

- $h_l = 0 \Rightarrow$  a medida da perda de carga é feita em um a região linear sem restrições ao fluido, como joelhos e T's.
- $\alpha_1$  e  $\alpha_2 = 1 \Rightarrow \alpha$  é razoavelmente próximo de 1 para escoamento turbulento.
- $\frac{\bar{V}_1^2}{2} = \frac{\bar{V}_2^2}{2} \Rightarrow$  escoamento completamente desenvolvido num tubo de área transversal constante.

Como o tubo se encontra na horizontal, esta equação pode sofrer mais uma simplificação pois  $z_1 = z_2$ .

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{\Delta p}{\rho} = h_d \quad (3)$$

Através de uma análise dimensional da queda de pressão ( $\Delta p$ ), mostra-se que:

$$h_d = f \frac{L \bar{V}^2}{D} \quad (4)$$

Igualando (3) e (4), tiramos a relação para o fator de atrito  $f$ :

$$f = \frac{\Delta p}{\rho} \frac{2D}{L \bar{V}^2} \quad (5)$$

Agora podemos calcular os fatores de atrito experimentais e compararmos com os teóricos para vários *Números de Reynolds*.

Os fluidos poliméricos analisados tem um comportamento não Newtoniano pseudoplástico, i.e., sua viscosidade é função da taxa de deformação. As viscosidades dos fluidos poliméricos foram obtidas utilizando os reômetros rotacionais (ARES, da TA e UDS 200 da Paar-Physica), disponíveis

no Laboratório de Caracterização de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO. Após a obtenção da curva viscosidade x taxa de cisalhamento, obtém-se, a partir de um ajuste de curvas, uma equação matemática que descreva o comportamento do fluido. Os fluidos analisados foram bem modelados pela equação Power-Law, onde a viscosidade é dada por:

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

onde  $k$  significa o índice de consistência,  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento e  $n$  o índice exponencial. O reômetro já nos fornece a constante  $k$  e o expoente  $n$ . A taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ) varia ao longo do escoamento. Para o cálculo do número de Reynolds, utiliza-se uma viscosidade característica, avaliada na taxa de cisalhamento na parede do duto no escoamento laminar desenvolvido, dada por:

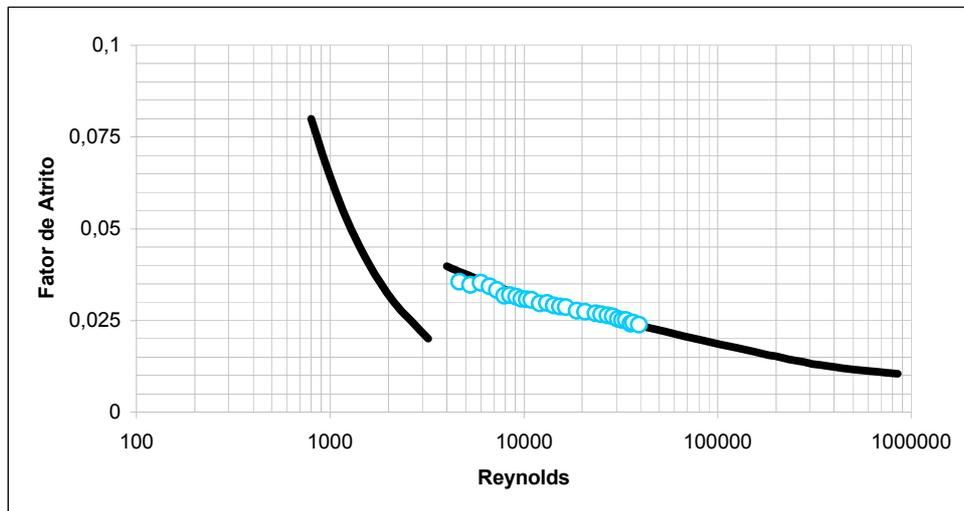
$$\dot{\gamma}_w = \left( \frac{8V}{D_i} \right) \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \quad (7)$$

onde  $V$  é a velocidade do fluido no interior do tubo,  $D_i$  é o diâmetro interno do tubo e  $n$  o índice exponencial.

## Capítulo 6

### Resultados Experimentais

Primeiramente, para garantirmos que o aparato experimental esteja nos fornecendo resultados coerentes, fizemos um teste com água pura para compararmos se os resultados experimentais estavam de acordo com a teoria. Os resultados experimentais foram então plotados no Diagrama de Moody (Fig 9), que nos mostra a curva da relação fator de atrito-Reynolds.

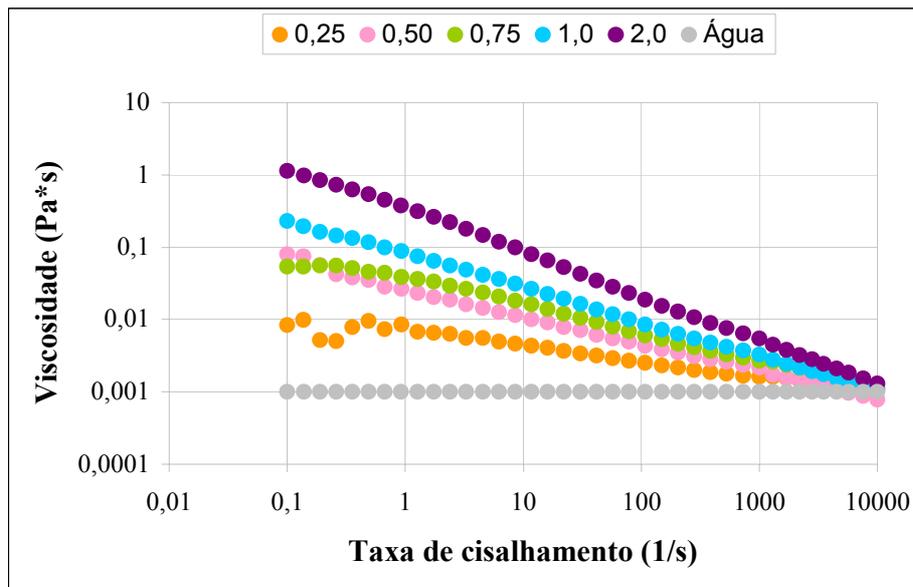


**Figura 9** - Resultado do teste experimental realizado com água pura.

Como podemos ver na figura acima, os resultados conseguidos experimentalmente estão em ótima concordância com os resultados da literatura, validando assim o aparato experimental.

A Figura 10 mostra a queda da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento para os primeiros testes com a Goma Xantana. Poderemos visualizar a faixa de viscosidade na qual os polímeros estão sendo testados, calculando a maior e a menor taxa de cisalhamento características. A menor taxa de cisalhamento foi calculada para a menor concentração (0,25g/L) e a maior taxa de

cisalhamento para a maior concentração (2g/L). Sendo calculada pela equação (7), essa faixa varia de 738[1/s] a 4361[1/s]. Nesta faixa pode-se observar que as viscosidades de todos os fluidos analisados são maiores do que a da água.



**Figura 10** - Queda da viscosidade com a taxa de cisalhamento.

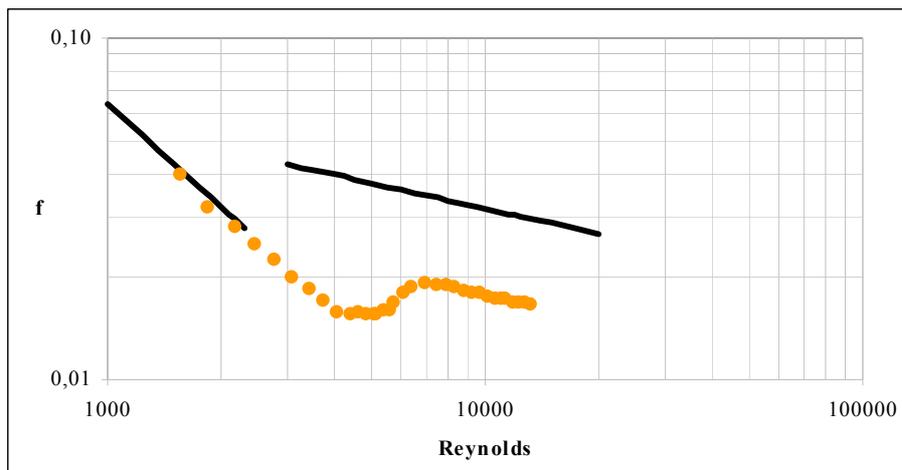
Os valores dos parâmetros  $n$  e  $k$  para cada concentração de Goma Xantana testada, estão mostrados na tabela abaixo.

| (g/L) | $k$    | $n$    |
|-------|--------|--------|
| 0,25  | 0,0064 | 0,8087 |
| 0,50  | 0,0271 | 0,6156 |
| 0,75  | 0,0350 | 0,6371 |
| 1,00  | 0,0815 | 0,5290 |
| 2,00  | 0,3386 | 0,3966 |

Os testes foram feitos utilizando a Goma Xantana em concentrações de 0,25g/L, 0,50g/L, 0,75g/L, 1g/L e 2g/L em água, a Goma Diutana na concentração de 0,25g/L em solução salina (3%), o PHPA na concentração de 0,75g/L em solução salina, e a Goma Xantana na concentração de

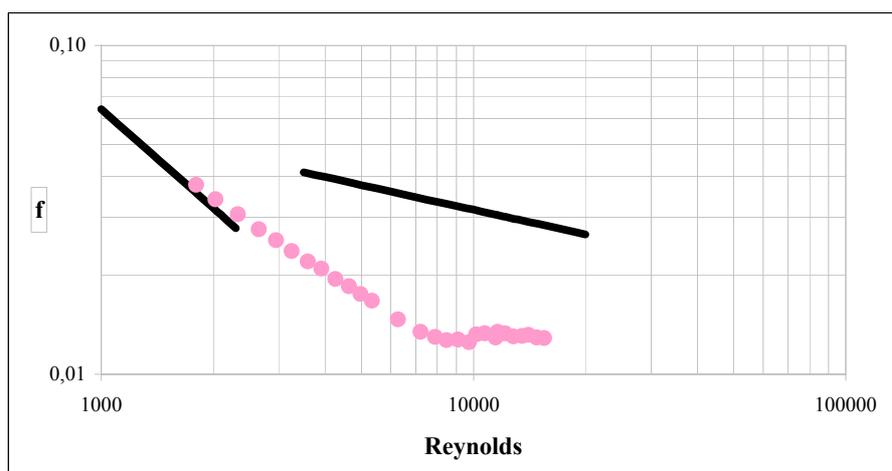
0,75g/L em solução salina. Todos os resultados estão mostrados nas figuras 11 a 21, sendo que a linha preta contínua representa a curva *fator de atrito x Reynolds* para a água. Inicialmente nas figuras 11 a 15 são apresentados os resultados da Goma Xantana diluída em água.

➤ **Goma Xantana 0,25g/L em água.**



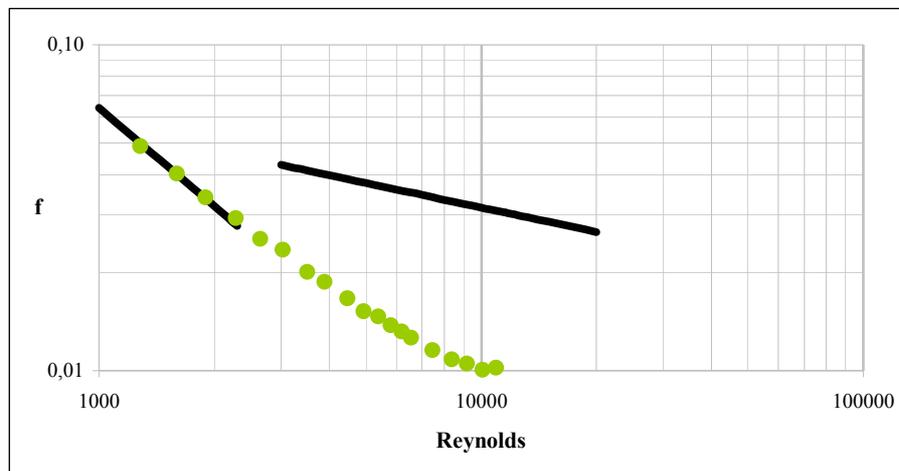
**Figura 11** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,25g/L.

➤ **Goma Xantana 0,50g/L em água.**



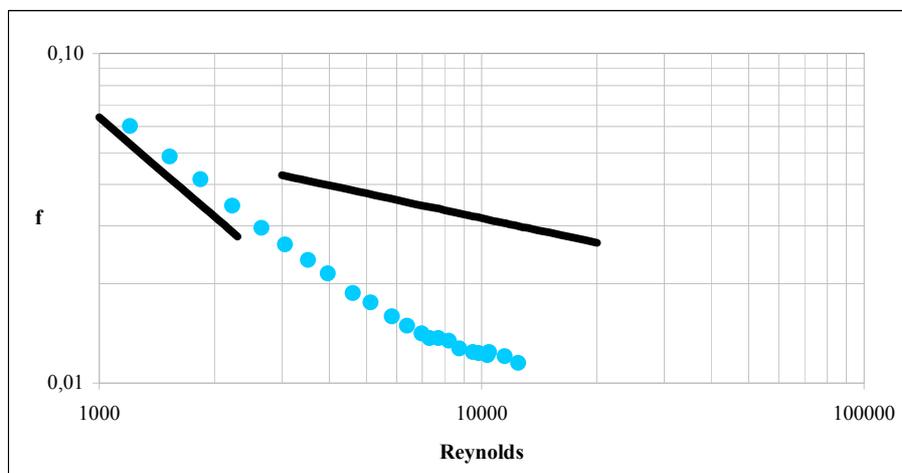
**Figura 12** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,50g/L.

➤ **Goma Xantana 0,75g/L em água.**



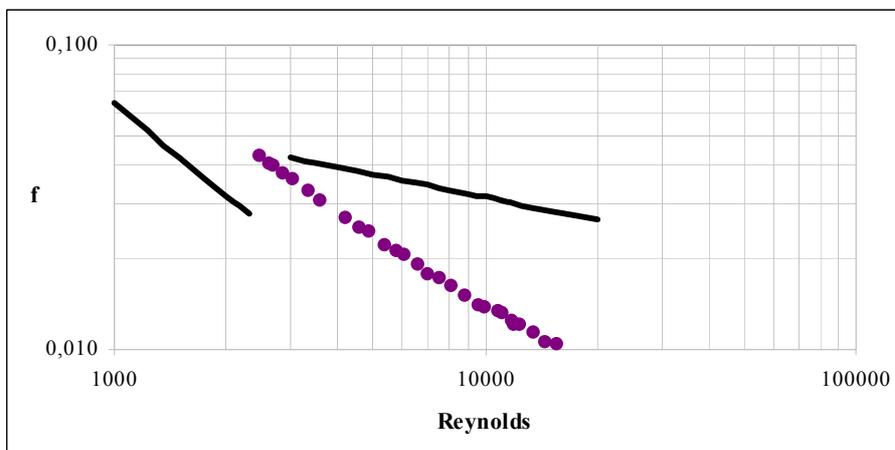
**Figura 13** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 0,75g/L.

➤ **Goma Xantana 1g/L em água.**



**Figura 14** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 1,0g/L.

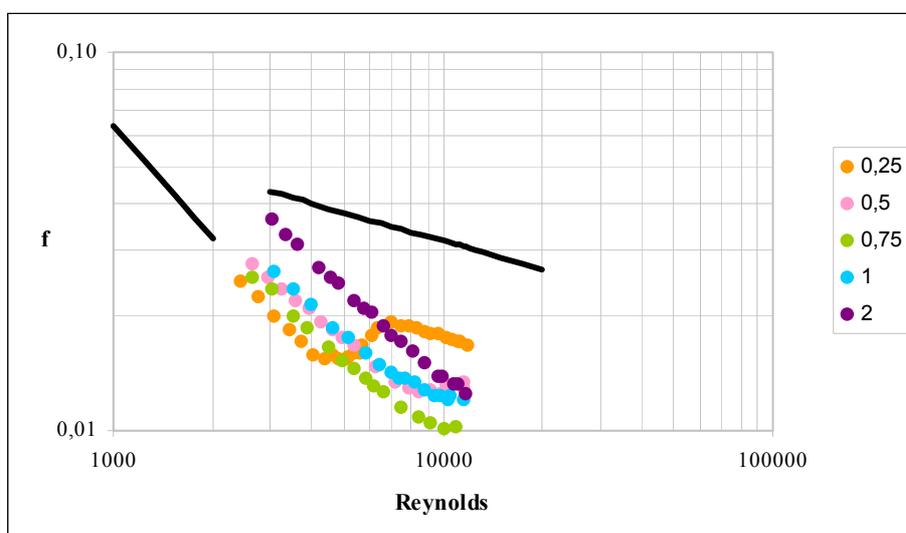
➤ **Goma Xantana 2g/L em água.**



**Figura 15** - Redução de arrasto encontrada experimentalmente para a Goma Xantana 2,0g/L.

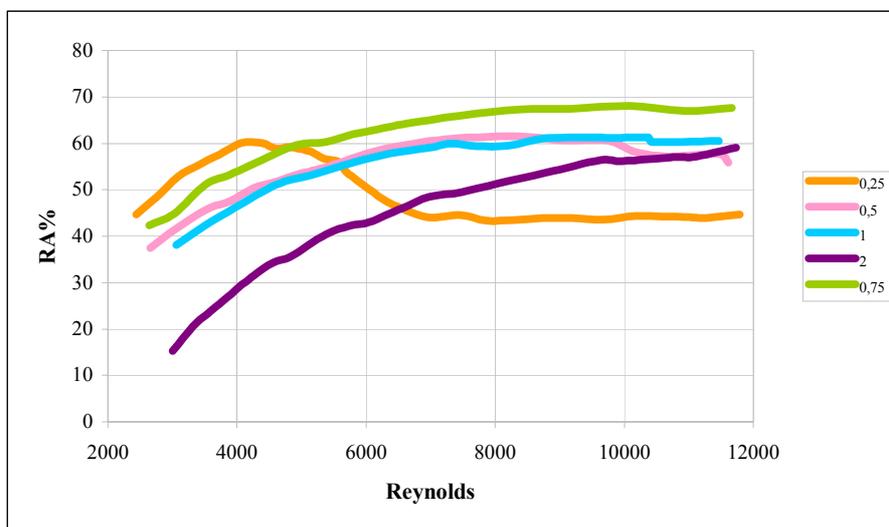
Observa-se que na região laminar os valores obtidos são próximos da água, exceto para os casos de maior concentração de polímeros, quando o fator de atrito fica um pouco acima do da água. Na região turbulenta ( $Re$  acima de 2300) percebemos através dos gráficos acima, que ocorre uma laminarização do escoamento, i.e., a utilização dos polímeros parece amortecer os vórtices turbulentos, e o fator de atrito obtido é similar ao do regime laminar, e portanto bem inferior ao da água no regime turbulento. Porém, a partir de um valor crítico de Reynolds, o fator de atrito aumenta, provavelmente devido à degradação do polímero. No caso 0,25 g/L este comportamento está mais evidente, pois observa-se um grande aumento do fator de atrito quando o número de Reynolds é da ordem de 5000. Nos outros casos, esta alteração ocorre um pouco mais tarde, e o aumento do fator de atrito é menor. Na região laminar observa-se que o fluido com maior concentração de polímeros, mais viscoso e com viscosidade mais dependente da taxa de deformação (expoente  $n$  menor), é o que apresenta os maiores valores de fator de atrito, e um pouco diferentes da água. Este comportamento permanece no regime turbulento, i.e., o fluido com maior

concentração de polímeros é o que fornece a menor redução de arrasto. Porém, a degradação é retardada com o aumento da concentração. Assim, para maiores valores de Reynolds, os fluidos com maior concentração de polímeros apresentam a maior redução de arrasto. Estes resultados podem ser melhor analisados com o auxílio da figura 16, onde mostra-se uma comparação entre os resultados para as diferentes concentrações.



**Figura 16** – Comparação entre todos os resultados encontrados.

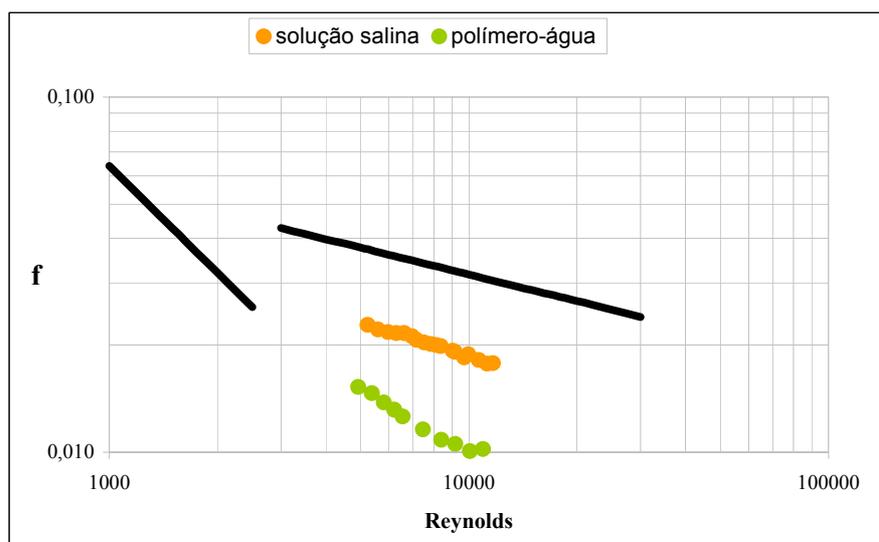
A Figura 17 mostra a redução de arrasto em porcentagem (RA%) em função do *Números de Reynolds*.



**Figura 17** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.

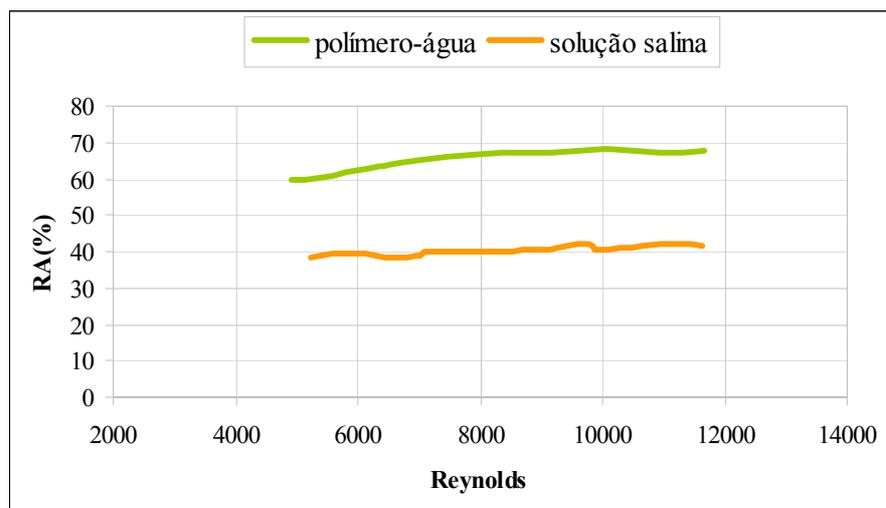
Os resultados mostrados acima foram adquiridos de uma solução polímero-água. Os próximos resultados foram obtidos de uma solução polímero-água-sal, e são representados figuras 18 a 21. Essa solução salina nos aproxima mais da real redução de arrasto pois se assemelha mais com a solução utilizada na prática.

➤ **Goma Xantana 0,75g/L em solução salina.**



**Figura 18** - Comparação da redução de arraste para diferentes soluções.

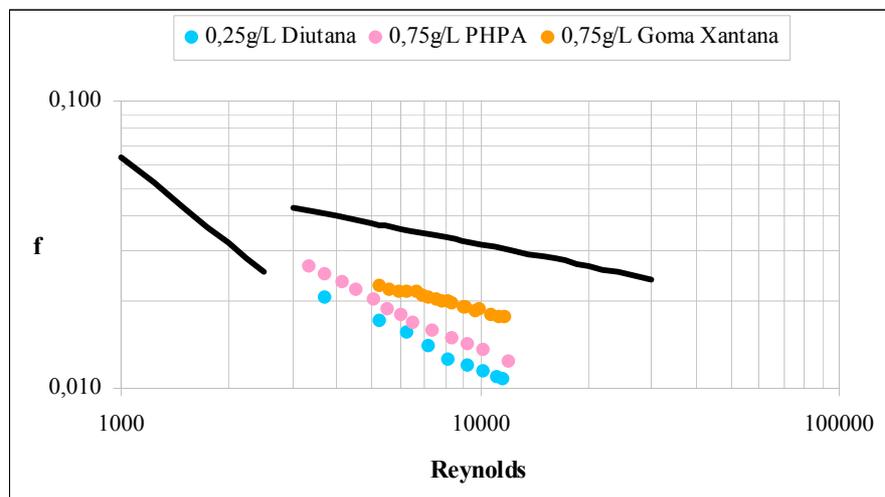
Nota-se que a redução de arraste é diminuída consideravelmente na solução salina em todas as faixas de Reynolds. Porém, não observou-se a degradação na solução salina na faixa de Reynolds analisada, enquanto que na solução polímero-água a degradação parece se iniciar para Reynolds na faixa de 10000. No gráfico abaixo podemos ver a porcentagem de redução obtida nos dois casos.



**Figura 19** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.

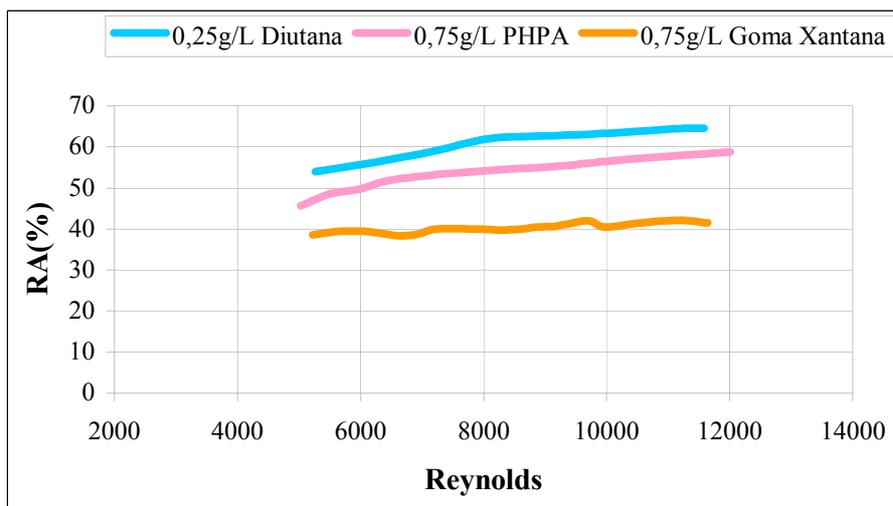
Podemos ver que a queda da redução de arrasto da solução salina para a não salina chega na casa dos 20%, mesmo assim a redução mantém-se em 40%. Essa redução de arrasto encontrada de 40% pode ser ainda maior para diferentes polímeros e concentrações como nos mostra a Figura 20.

➤ **Goma Xantana 0,75g/L , Diutana 0,25g/L e PHPA 0,75g/L em soluções salinas.**



**Figura 20** - Resultados utilizando outros polímeros em soluções salinas.

Utilizando outros polímeros como o PHPA e a Diutana, obtivemos reduções ainda maiores. Com uma concentração menor de Diutana (0,25g/L), a redução de arrasto já possui um aumento significativo se comparado com o resultado anterior e uma redução maior ainda se utilizando o PHPA na concentração de 0,75g/L.



**Figura 21** - Redução de arrasto mostrado em porcentagem.

A porcentagem de redução de arraste chegou na faixa de 65% para a Goma Diutana e 59% para o PHPA.

## Capítulo 7

### Conclusões

Este projeto teve como objetivo comprovar a existência da diminuição do fator de atrito de um escoamento no interior de um tubo, sob a adição de uma pequena quantidade de polímero. Os polímeros utilizados foram a Goma Xantana nas concentrações de 0,25g/L - 0,50g/L - 0,75g/L – 1g/L – 2g/L em água, a Diutana na concentração de 0,25g/L em solução salina (3%), o PHPA na concentração de 0,75g/L em solução salina e a Goma Xantana na concentração de 0,75g/L em solução salina.

Um aparato experimental foi montado para medirmos a perda de carga do fluido em um determinado segmento da tubulação e os resultados experimentais compreendidos numa faixa de *Número de Reynolds* entre 3000 e 12000, tendo em vista que esses são os valores de *Reynolds* utilizados no bombeamento de óleo nas indústrias petrolíferas.

Os resultados mostraram que aparentemente ocorre uma laminarização do escoamento quando polímeros são adicionados, com o fator de atrito se comportando de forma similar ao caso laminar, e portanto com valores bem inferiores aos obtidos no regime turbulento. Porém, observa-se também em alguns casos, um aumento posterior do fator de atrito. Este aumento se daria devido à degradação do polímero, que reduziria a sua influência sobre o padrão turbulento de escoamento. As maiores reduções de arrasto foram encontradas com os polímeros Goma Diutana (65%) e o PHPA (59%). Observou-se que em soluções salinas as reduções de arrasto são menores que em água pura para a mesma concentração de polímero.

O estudo da redução de arrasto vem tendo uma importância muito grande devido à alta diminuição da energia gasta para o bombeamento do óleo. Essa economia de energia pode chegar a

60%, dependendo do polímero utilizado e de sua concentração, por isso muitos estudos estão sendo feitos para se descobrir qual a concentração ideal e o polímero ideal a ser utilizado nos escoamentos.

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a minha professora orientadora Mônica Feijó Naccache pela oportunidade que me deu de participar de um projeto como esse. Agradeço muito também ao Eduardo Dutra que me ajudou muito a resolver os problemas que tive durante o projeto. É claro que não poderia me esquecer do David e do Lourenço que me ajudaram muito na construção do aparato e dos Marcos (Figueiredo e Vinícius) que me ajudaram com os resultados experimentais.

## Referências bibliográficas

- Escudier, M.P.; Presti, F.; Smith, S. (1999); "Drag reduction in the turbulent pipe flow of polymers"; *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* (81), pp. 197-213.
- Min, T.; Yoo, J.Y.; Choi, H.; JOSEPH, D.D. (2003); "Drag reduction by polymer additives in a turbulent channel flow"; *J. Fluid Mech.*, vol. 486, pp. 213-238.
- Sohna, J.-I.; Kimb, C.A.; Choib, H.J.; Jhon, M.S. (2001); "Drag-reduction effectiveness of xanthan gum in a rotating disk apparatus"; *Carbohydrate Polymers* (45), pp. 61-68.
- Min, T.; Choi, H.; Yoo, J.Y. (2003); "Maximum drag reduction in a turbulent channel flow by polymer additives"; *J. Fluid Mech.* (492), pp. 91-100.
- Kim, C.A.; Jo, D.S.; Choi, H.J.; Kim, C.B.; Jhon, M.S. (2001); "A high-precision rotating disk apparatus for drag reduction characterization"; *Polymer Testing* (20), pp. 43-48.

