

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

THAÍS CRISTINA DESTEFANI

Redução de Atrito no Escoamento de Óleo Diesel

CAMPINAS
2011

Este exemplar corresponde à redação final da dissertação defendida por **Thaís Cristina Destefani** pela Comissão julgadora em **25/02/2011**.



Orientador

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Redução de Atrito no Escoamento de Óleo Diesel

Autor: Thaís Cristina Destefani
Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart
Co-orientador: Prof. Dr. Edvaldo Sabadini

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo
Área de Concentração: Exploração

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2011
SP – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

D473r Destefani, Thaís Cristina
Redução de atrito no escoamento de óleo diesel /
Thaís Cristina Destefani. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientadores: Antonio Carlos Bannwart, Edvaldo Sabadini.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Redução de atrito. 2. Escoamento. 3. Combustíveis diesel. 4. Reômetros. I. Bannwart, Antonio Carlos. II. Sabadini, Edvaldo. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Título em Inglês: Drag reduction during flow in diesel oil

Palavras-chave em Inglês: Drag reduction, Flow, Diesel fuel, Rheometers

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora: Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno, Paulo de Tarso
Vieira e Rosa

Data da defesa: 25/02/2011

Programa de Pós Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS E ENGENHARIA DE PETRÓLEO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Redução de Atrito no Escoamento de Óleo Diesel

Autor: Thaís Cristina Destefani
Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart
Co-orientador: Prof. Dr. Edvaldo Sabadini

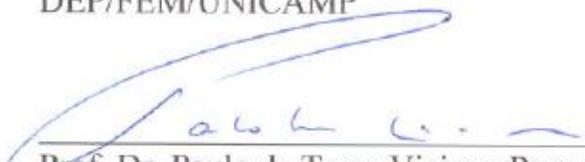
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Antônio Carlos Bannwart, Presidente
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno
DEP/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Paulo de Tarso Vieira e Rosa
DQF/IQ/UNICAMP

Campinas, 25 de Fevereiro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João e Íria, minha irmã, Thalita e aos meus seis avós, *in memoriam*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Ao meu orientador Antonio Carlos Bannwart pela oportunidade e ajuda em todas as etapas deste trabalho. Agradeço ao meu co-orientador Edvaldo Sabadini, por todo apoio, ajuda e orientação desde meu primeiro ano de graduação. À Vanessa C. Bizotto Guersoni, por toda a ajuda na montagem, execução e discussão dos resultados neste trabalho.

À PETROBRAS pela bolsa de estudos concedida.

À Roberta Kamei Rodrigues e a LÍlian Padula pela ajuda com o reômetro e a todos os colegas e amigos do laboratório de Físico-Química do Instituto de Química.

À Natache Sassim, Matheus Gervais, Leandro Cassanelli e Ricardo Caliari do LabPetro (CEPETRO) pela grande ajuda na montagem e execução dos experimentos.

Ao professor Eugênio Spanó Rosa, pelos esclarecimentos na discussão dos resultados.

Aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia de Petróleo, pelo apoio, discussões sobre nossos projetos, e principalmente pela amizade e companheirismo.

À equipe Sonhando Juntos da ONG Sonhar Acordado Campinas, pelo apoio, amizade e paciência na etapa final deste projeto.

À Ju, Ro (novamente) por toda amizade e apoio desde o início de nossa jornada na Unicamp. Ao Kiko pela amizade de muitos anos e auxílio com as informações sobre a PETROBRAS. Ao Tiba, Vítor, Lia, Dani, Lídia, Marina e Érica pela amizade de anos.

Ao Fábio, por existir.

Vamos tentar um método; se falhar, admitimos e tentamos outro. Mas, acima de tudo, tentaremos alguma coisa.

Franklin Roosevelt

RESUMO

DESTEFANI, Thaís Cristina. Redução de Atrito no Escoamento de Óleo Diesel. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 86 p. Dissertação de Mestrado.

A redução de atrito hidrodinâmico tem importantes aplicações em engenharia de petróleo, propiciando a produção e o transporte de petróleo ou seus derivados a vazões mais altas. As dimensões continentais do território brasileiro implicam na necessidade de uma eficiente rede de distribuição de derivados de petróleo, como por exemplo, o óleo diesel. O presente trabalho visa investigar o desempenho de dois agentes redutores de atrito (ARA's) comerciais que, injetado em ínfimas proporções (da ordem de ppm) em uma tubulação de escoamento de diesel, podem causar significativa diminuição em sua tensão de cisalhamento turbulenta, reduzindo a queda de pressão por atrito durante seu escoamento no interior de um tubo. Em uma primeira fase, as amostras com e sem ARA foram testadas em um reômetro, utilizando uma cela tipo Couette, avaliando a proporção do torque aplicado no diesel puro e no diesel com ARA, a uma mesma velocidade angular. Com uma concentração de 7 ppm foi observada uma redução de atrito da ordem de 13% e 18% para cada um dos aditivos. A avaliação da redução do atrito em tubulação consiste na comparação do diferencial de pressão obtido para escoamento de diesel com e sem ARA em um trecho de tubo. Estes experimentos mostram uma redução de atrito de 48% e 58% na injeção de 50 ppm de cada um dos aditivos estudados. Apesar dos experimentos em reômetro terem maior rapidez, controle de variáveis e menor consumo de materiais, o escoamento no interior da cela Couette é diferente em relação ao escoamento em tubulações. No entanto, os testes em tubulações são mais próximos das demandas reais, sendo assim importantes para o entendimento do fenômeno.

Palavras-Chave

Redução de Atrito, Escoamento, Óleo Diesel, Reômetro

ABSTRACT

DESTEFANI, Thaís Cristina. Drag Reduction During Flow in Diesel Oil. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 86 p. Master Dissertation.

The drag reduction has important applications in petroleum engineering, allowing production and transportation of oil and derivatives at higher flow rates. The continental dimensions of Brazil implies the necessity for an efficient distribution network for oil products, such as diesel. This study aims to investigate the performance of two commercial drag reduction agents (DRA's), injected in very small proportions (the order of ppm) in a diesel fuel pipe flow. This injection may induce significant decrease in the turbulent shear stress, reducing the pressure drop by friction during the flow inside a tube. In a first step, samples with and without DRA were tested in a rheometer using a Couette cell type. The ratio of torque applied in pure diesel and diesel with DRA were analyzed at the same angular velocity. Using 7 ppm of concentration for both DRA, it was observed drag reduction of the order of 13% and 18% for each additives. The analysis of drag reduction in pipe flow involves the ratio of pressure differential by the flow of diesel with and without DRA in a section of tube. These tests show a drag reduction of 48% and 58% with 50 ppm for each DRA studied. Despite the rheometer experiments offer greater speed, control variables and lower consumption of materials, the flow inside the Couette cell is different compared with flow pipes. However, tests on pipes are closer to real demands therefore important for understanding the drag reduction phenomenon. With these experimental data, it is expected to determine correlations between tests in pipeline and rheometer, estimating the turbulence effect in these two systems.

Key Words

Drag Reduction, Flow, Diesel Fuel, Rheometer

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	xvii
1. O FENÔMENO DA REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO E APLICAÇÃO NO BOMBEAMENTO DE COMBUSTÍVEIS.....	1
1.1. Óleo diesel e distribuição de combustíveis no Brasil	1
1.2. O fenômeno da redução de atrito hidrodinâmico e sua importância	4
1.3. O início da redução de atrito – Efeito Toms	7
1.4. Escalas de turbulência de Kolmogorov.....	12
1.5. Teoria elástica de De Gennes.....	13
1.6. Avaliação da redução de atrito em tubulações	15
1.7. Modelos de escoamento em tubulações.....	16
1.8. Mudanças no fator de fricção na presença de um redutor de atrito.....	19
1.9. Redução de atrito em reômetro – alternativa aos testes em tubulação	21
1.10. Objetivos	23
2. EXPERIMENTOS DE REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO EM REÔMETRO	25
2.1. Preparação das amostras de aditivo em óleo diesel.....	25
2.2. Reômetro utilizado nos experimentos.....	25

2.3. Reprodutibilidade dos testes em reômetro	27
2.4. Concentração ótima de aditivos redutores de atrito em reômetro	28
2.5. Redução de atrito no reômetro em termos de número de Reynolds	32
2.6. Efeito da temperatura na redução de atrito estudada no reômetro	34
2.7. Degradação mecânica do agente redutor de atrito em reômetro	35
3. CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	42
3.1. Equipamentos utilizados na construção do circuito.....	45
3.1.1. Tubulação e válvulas da linha principal	45
3.1.2. Reservatórios de diesel e descarte.....	45
3.1.3. Tanque para solução estoque de aditivo em diesel	46
3.1.4. Bomba centrífuga.....	46
3.1.5. Bomba para injeção de solução estoque de aditivo.....	47
3.1.6. Medidor mássico de vazão na linha de óleo diesel principal.....	48
3.1.7. Medidor mássico de vazão para solução estoque de aditivo	49
3.1.8. Transmissor de pressão	49
3.1.9. Termorresistência.....	50
3.1.10. Sistema de aquisição de dados.....	50
3.2. Funcionamento do circuito	50
3.3. Ajustes pós-construção do circuito.....	51
3.3.1. Limitação na pressão da linha de escoamento	51
3.3.2. Estabilidade da linha em relação ao escoamento de óleo diesel.....	51
3.3.3. Injeção da solução estoque de aditivo na linha de diesel.....	54

3.4. Procedimento experimental de medida de redução de atrito em linha.....	56
4. EXPERIMENTOS DE REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO EM LINHA DE ESCOAMENTO.....	60
4.1. Resultado do primeiro teste.....	60
4.2. Degradação Mecânica do Aditivo em Linha.....	61
4.3. Resultados da injeção de aditivos no escoamento de óleo diesel.....	63
4.4. Parâmetros de comparação entre reômetro e tubulação no escoamento de óleo diesel.....	65
4.4.1. Tensão de cisalhamento.....	65
4.4.2. Taxa de cisalhamento	65
4.4.3. Velocidade do óleo diesel.....	66
4.4.4. Potências dissipadas	66
4.4.5. Tamanho dos vórtices turbulentos	70
4.4.6. Porcentagem de redução de atrito	72
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	74
5.1. Conclusões	74
5.2. Recomendações para trabalhos futuros.....	75
REFERÊNCIAS.....	77
ANEXO I.....	85
Anexo II.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Representação esquemática dos principais polidutos que integram a rede de distribuição de combustíveis da Transpetro Distribuidora (Comunicação Pessoal).....	3
Figura 1.2: Mapa da tubulação Trans-Alaska construída entre 1974 e 1977.	6
Figura 1.3: Cadeia polimérica com volume aproximado de uma esfera de raio R_g , que é o Raio de giração desta molécula (Teraoka, 2002).	8
Figura 1.4: Regimes de concentração para soluções de polímeros lineares flexíveis: solução diluída ($c \ll c^*$), solução em overlap de concentração ($c \sim c^*$) e solução semidiluída ($c \gg c^*$), onde c^* é a concentração onde as macromoléculas começam a se tocar (Teraoka, 2002).	8
Figura 1.5: Representação esquemática do desenvolvimento de um vórtice e sua interação com a macromolécula (em vermelho), impedindo seu desenvolvimento (Bizotto, 2008).	14
Figura 1.6: Máximas assíntotas de redução de atrito (Virk, 1971).	17
Figura 1.7: Diagrama de Moody extraído de Japper-Jaafar et al, 2009. Os pontos vazados representam a redução de atrito utilizando scleroglucan (polisacarídeo produzido pelo fungo <i>Sclerotium</i>), que também pode ser usado como um aditivo redutor de atrito.	19
Figura 1.8: Modelo de parâmetros em coordenadas Prandtl-Karman (Hinkebein, 1985).	20
Figura 1.9: Esquemas de equipamentos usados para medida da redução de atrito hidrodinâmico: A - Reômetro capilar e B - cela de Couette usada em um reômetro rotacional (Bizotto <i>et al.</i> 2011).	22
Figura 1.10: Curva de fluxo (torque em função da velocidade angular) para o solvente puro (linha contínua) e para o solvente contendo um polímero redutor de atrito (linha tracejada): Gráfico genérico mostrando o comportamento reológico obtido nos estudos usando o sistema de cela Couette para a determinação da porcentagem de redução de atrito (Bizotto et al, 2011).	23
Figura 2.1: Esquema da cela do tipo Couette utilizada nos experimentos de redução de atrito em reômetro (Thermo Haake, 2003).	26
Figura 2.2: Fotografia do reômetro utilizado com a cela tipo Couette acoplada.	26
Figura 2.3: Redução de atrito do Aditivo A em óleo diesel em concentrações de 1 a 10 ppm a 2478 rpm. Dados são referentes a triplicata.	28

Figura 2.4: Variação do torque em função da velocidade angular para soluções de diesel S500 com o agente redutor de atrito A, em concentrações variando de 0 a 10 ppm. O detalhe da figura é uma ampliação da parte final do gráfico.	29
Figura 2.5: Variação do torque em função da velocidade angular para soluções de diesel com o Aditivo B em concentrações variando de 0 a 10 ppm. O detalhe da figura é uma ampliação da parte final do gráfico.	31
Figura 2.6: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração dos Aditivos A e B em óleo diesel. A velocidade angular foi de 2480 rpm.	32
Figura 2.7: Curva de fluxo – Torque em função do número de Reynolds para o óleo diesel sem e com 7 ppm de Aditivo A (esquerda) e Aditivo B (direita).	33
Figura 2.8: Redução de atrito em função do número de Reynolds. Estão representados somente os dados com RA maiores que zero.	34
Figura 2.9: Porcentagens de redução de atrito em função da temperatura em reômetro na concentração de 7 ppm.	35
Figura 2.10: Curva de Fluxo: torque em função da velocidade angular para solução de 7 ppm do aditivo A. As curvas de pontos cheios são antes do cisalhamento constante a 2000 rpm. As curvas de pontos vazados são as curvas de fluxo obtidas após o tempo indicado em que a solução foi submetida ao cisalhamento constante.	36
Figura 2.11: Torque em função do tempo de cisalhamento para diesel puro e soluções de aditivo A durante 30 minutos de cisalhamento constante a 2000 rpm, antes e após uma semana de repouso.	37
Figura 2.12: Curva de Fluxo: velocidade angular em função do torque para solução de 7 ppm do aditivo B. As curvas de pontos cheios são antes do cisalhamento constante a 2000 rpm. As curvas de pontos vazados são as curvas de fluxo obtidas após o tempo indicado em que a solução foi submetida ao cisalhamento constante.	38
Figura 2.13: Torque em função do tempo de cisalhamento para diesel puro e soluções de aditivo B durante 30 minutos de cisalhamento constante a 2000 rpm, antes e após uma semana de repouso.	38
Figura 2.14: Torque em função do tempo de cisalhamento constante a 2000 rpm durante 30 minutos.	39

Figura 2.15: Dependência de $\ln(\tau_M/\tau_{p,t})$ em função do tempo para soluções de 7 ppm dos Aditivos A e B a uma velocidade angular constante de 2000 rpm. A correlação linear é mostrada para os primeiros 120 segundos no Aditivo A e 240 segundos no Aditivo B.	40
Figura 3.1: Desenho esquemático do circuito de tubulação para o estudo de redução de atrito hidrodinâmico.	42
Figura 3.2: Planilha de dados utilizada no projeto do circuito de testes de redução de atrito em linha no LabPetro. Os cálculos de concentração de solução estoque estão em uma segunda planilha.....	44
Figura 3.3: Reservatórios de óleo diesel (esquerda) e descarte (direita) que se localizam na parte externa ao LabPetro.	45
Figura 3.4: Tanque para solução estoque de aditivo redutor de atrito em diesel e bomba helicoidal para injeção da solução estoque de aditivo na linha de diesel. No canto superior esquerdo pode-se observar o medidor de vazão mássica da solução estoque.	46
Figura 3.5: Bomba centrífuga utilizada no escoamento do óleo diesel. Acima, reservatório de óleo diesel.....	47
Figura 3.6: Medidor mássico de vazão tipo coriolis utilizado na linha de diesel.	48
Figura 3.7: Transmissor de pressão (mbar) de dois pontos da linha de diesel, distantes por 4 m. A frente, válvula manifold de 5 vias. O canal da esquerda é conectado ao primeiro ponto de tomada de pressão e o canal da direita, é conectado ao segundo ponto de pressão.	49
Figura 3.8: Perda de carga e vazão em função da rotação da bomba centrífuga no escoamento de óleo diesel.	52
Figura 3.9: Óleo diesel coletado pelo dreno no recalque da bomba injetora de solução estoque de aditivo. A espuma é coletada juntamente com o diesel.	53
Figura 3.10: Fator de atrito em função do número de Reynolds para o intervalo de vazões de 80 a 273 kg/min na linha de escoamento de diesel.	54
Figura 3.11: Vazão de injeção da solução de aditivos (em kg/h e kg/min) em função da rotação da bomba injetora. O gráfico foi obtido com a linha principal operando a vazão de 264 kg/min.....	55
Figura 3.12: Representação do cálculo da porcentagem de redução de atrito a partir de um gráfico de Perda de Carga em função do Tempo. Este teste representa a injeção de 10 ppm do Aditivo B em uma vazão de 261 kg/min de diesel a 31°C.....	57

Figura 3.13: Perda de carga em função da temperatura para o escoamento de óleo diesel sem aditivos na linha principal a uma vazão de aproximadamente 260 kg/min.	58
Figura 3.14: Gráfico do teste de injeção comprometido pelo nível baixo de óleo diesel no tanque de armazenamento. Esses dados são referentes à injeção de 20 ppm do Aditivo B em uma vazão de 256 kg/min e 35°C.	59
Figura 4.1: Perda de carga (em preto) e vazão do diesel (em vermelho) em função do tempo de escoamento na tubulação de óleo diesel. Os dados representados no gráfico à direita foram obtidos no dia seguinte aos dados representados no gráfico à esquerda Os dois experimentos totalizaram 4 horas e 35 minutos de escoamento.	61
Figura 4.2: Perda de carga e temperatura da linha em função do tempo de escoamento do óleo diesel, na vazão de 264 kg/min.	62
Figura 4.3: Torque em função da velocidade angular para diesel puro e diesel contaminado depois de 4 horas e 35 minutos circulando pela tubulação.	63
Figura 4.4: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração dos Aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a uma vazão de 260 kg/min. A linha tracejada é uma guia para os olhos.	64
Figura 4.5: Potência dissipada em função da concentração dos Aditivos A e B em óleo diesel, analisados em reômetro, a uma velocidade angular de 2479 rpm.	67
Figura 4.6: Relação entre potência dissipada e porcentagem de redução de atrito para concentrações de 1 a 10 ppm dos Aditivos A e B em reômetro.	68
Figura 4.7: Potência dissipada em função da concentração de Aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a uma vazão de 260 kg/min. A linha tracejada é uma guia para os olhos.	69
Figura 4.8: Relação entre potência dissipada e porcentagem de redução de atrito para os aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a 260 kg/min.	70
Figura 4.9: Tamanho de vórtices em função da concentração dos aditivos A e B, em reômetro. ..	71
Figura 4.10: Tamanho de vórtices em função da concentração para os Aditivos A e B em tubulação. A linha tracejada é uma guia para os olhos.	72
Figura 4.11: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração de Aditivo B em reômetro e tubulação. A linha tracejada é uma guia para os olhos.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Porcentagem de redução de atrito em reômetro, para 5 soluções de 7 ppm para os aditivos A e B.	27
Tabela 3.1: Parâmetros principais do circuito montado no LabPetro.	43
Tabela 3.2: Valores de perda de carga na linha de escoamento de óleo diesel de acordo com a vazão de injeção da bomba dosadora.	55
Tabela 4.1: Dados do primeiro experimento de redução de atrito na linha de óleo diesel.	60

LISTA DE NOMENCLATURAS

Letras Latinas

a	Distância entre rotor e fundo do copo	[mm]
a_m	Comprimento do monômero	[m]
c_M	Concentração de polímero em $t = 0$	[ppm]
c_{p,t}	Concentração do polímero intacto em um tempo específico	[ppm]
c*	Concentração do polímero no regime semi-diluído	[ppm]
D	Diâmetro de tubulação	[m] ou [in]
D_M	Diâmetro efetivo da macromolécula polimérica	[m]
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h_{lt}	Somatório das perdas de carga na tubulação	[m]
k	Constante de Boltzman	
k_p	Taxa de degradação do polímero que compõe o aditivo	[s ⁻¹]
L	Distância entre dois pontos de tomada de pressão em uma tubulação	[m]
L_c	Comprimento do cilindro Couette	[mm]
M	Torque no reômetro	[μ Nm]
N	Número de moléculas em um novelo polimérico	
p	Pressão	[kPa]
Q	Vazão mássica	[kg/min]
r	Escala de comprimento em um intervalo inercial	
R	Distância de ponta-a-ponta em um novelo polimérico	[m]
R_a	Raio do cilindro externo	[mm]
RA	Redução de atrito	[%]
Re	Número de Reynolds	
R_g	Raio de giração	[m]
R_i	Raio do cilindro interno	[mm]
R_T	Raio da tubulação	[pol]
t	Tempo	[s]

t_{relax}	Tempo de relaxação do polímero	[s]
T	Temperatura	[°C]
u_{τ}	Velocidade de fricção	[m/s]
U	Velocidade do fluido na tubulação	[m/s]
V_c	Volume da cela no reômetro	[mL]
W_R	Potência dissipada no reômetro	[W/kg]
W_T	Potência dissipada na tubulação	[W/kg]
y^+	Distância adimensional da parede do tubo	
z	Altura de sucção	[m]

Letras Gregas

ρ	Densidade	[kg/m ³]
τ_M	Tensão de cisalhamento no reômetro quando $t = 0$	[Pa]
$\tau_{p,t}$	Tensão de cisalhamento no reômetro em um determinado tempo	[Pa]
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede do tubo	[Pa]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
γ	Taxa de cisalhamento	[s ⁻¹]
Ω	Velocidade angular no reômetro	[rpm]
Δp	Variação de pressão entre dois pontos de uma tubulação	[mbar]
η	Comprimento dos menores vórtices turbulentos	[m]
μ	Viscosidade dinâmica	[mPa.s]
ε	Taxa de dissipação de energia turbulenta	[W/kg]
ε_{rug}	Rugosidade em uma tubulação	[mm]

Abreviações

RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i> (Altura Manométrica Positiva Líquida de Sucção)

Siglas

DEP Departamento de Engenharia de Petróleo

IQ Instituto de Química

1. O FENÔMENO DA REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO E APLICAÇÃO NO BOMBEAMENTO DE COMBUSTÍVEIS

1.1. Óleo diesel e distribuição de combustíveis no Brasil

Óleo diesel é um combustível derivado de petróleo e consiste principalmente de carbonos alifáticos contendo de 8 a 28 átomos de carbono com ponto de ebulição variando de 130 a 370°C (Braun *et al.* 2003). Pode ser considerado uma blenda de hidrocarbonetos de frações mais pesadas que as encontradas na gasolina e com uma razão em massa de Hidrogênio/Carbono mais baixa, o que estabelece uma maior emissão de compostos de carbono por unidade de energia entregue ao motor. As características de um motor de ciclo diesel garantem um rendimento térmico superior aos motores de ciclo Otto (devido ao excesso de ar utilizado na explosão do ciclo diesel) compensando amplamente a desvantagem da composição deste combustível, quando o parâmetro analisado é a relação emissão/energia. Por essa razão, aqui no Brasil, motores de ciclo Otto são utilizados em veículos leves e de passeio, enquanto que motores de ciclo diesel são utilizados em veículos para transporte de carga pesada (Menezes *et al.* 2006).

O diesel possui uma estrutura química que facilita a propriedade de auto-ignição sob condições específicas. Esta característica é expressa pelo número de cetano, o qual é determinado por comparação com dois hidrocarbonetos de referência, através do procedimento padronizado pela ASTM D 613 (Menezes *et al.* 2006). A medida do número de cetano influencia a eficiência do ciclo térmico e a emissão de compostos ao meio-ambiente.

No Brasil, o consumo de petróleo é largamente determinado pelo consumo de óleo diesel, que é praticamente o dobro do consumo de gasolina. A mais alta demanda por óleo diesel concentra-se no setor de transportes, mais especificamente em rodovias, que corresponde a 74% da demanda total do combustível. Comparando-se com outros países, a produção doméstica de

óleo diesel é uma das maiores do mundo em relação ao total de óleo processado (Menezes *et al.* 2006).

Devido à alta emissão de poluentes e as pressões para a contenção de emissão de compostos nocivos à saúde e ao meio-ambiente, desde 2006 o óleo diesel comercializado no Brasil possui a adição de no mínimo 5% de biodiesel ao diesel destinado ao consumidor final. O óleo diesel utilizado neste trabalho é o óleo diesel metropolitano S500 (teor de enxofre de no máximo 500 mg/kg).

Para que o óleo diesel possa chegar até o consumidor final, ele é transportado por meio de tubulações extensas, também chamadas de Oleodutos. Praticamente todo o diesel transportado no mercado brasileiro vem através da rede de dutos existente entre as refinarias da Petrobras até os terminais de derivados das distribuidoras de combustíveis. Especificamente no norte do país, o óleo diesel é transportado dos terminais da Petrobras/Transpetro localizados nas principais Refinarias do Sul e Sudeste até os portos no litoral e, a partir desses portos, transportados por cabotagem até os terminais nas regiões Nordeste e Norte (Gómez, 2010). Esta distribuição geográfica heterogênea das refinarias no país faz com que o preço dos produtos derivados de petróleo seja relativamente mais elevado que o preço no Sul e Sudeste, uma vez que o custo do frete de transporte se torna expressivo na composição final dos preços (Soares et al. 2003)

A rede de oleodutos e terminais brasileiros é operada pela Transpetro, uma das subsidiárias da Petrobrás, com o auxílio de um sistema poderoso de monitoramento e controle das linhas o qual identifica anomalias na tubulação e redistribui os produtos dentro da malha de forma mais rápida e precisa (TN Petróleo, 2006). Nesta rede escoam petróleo, gás natural e alguns derivados como o próprio óleo diesel. Segundo Soares *et al.* (2003) o Brasil contava, em 2003, com uma malha dutoviária de aproximadamente 9000 km. Hoje esta malha subiu para 22000 km graças, sobretudo, aos investimentos em gasodutos (que correspondem à quase metade deste total). Com esta extensão o país encontra-se na 16ª posição no ranking mundial.

Uma das linhas mais importantes dentro da malha dutoviária brasileira é a linha conhecida como OSBRA (São Paulo-Brasília). Inaugurada em 1996, este é o maior poliduto do Brasil, possuindo pouco menos de 1000 km de extensão (962,87 km) os quais cortam três estados e chegam ao Distrito Federal (veja Figura 1.1). Até 2006, quase 30 milhões de litros de derivados de

petróleo eram bombeados por dia a uma vazão média de 1,2 milhão l/h. O principal objetivo de sua construção era reduzir o custo do transporte dos derivados, uma vez que esta alternativa apresenta baixo custo operacional e permite que grandes quantidades de produtos sejam transportados de forma segura. Hoje em dia constata-se que as regiões nas quais passa a linha principal e seus ramais, houve um rápido desenvolvimento em função das atividades de instalação e operação.

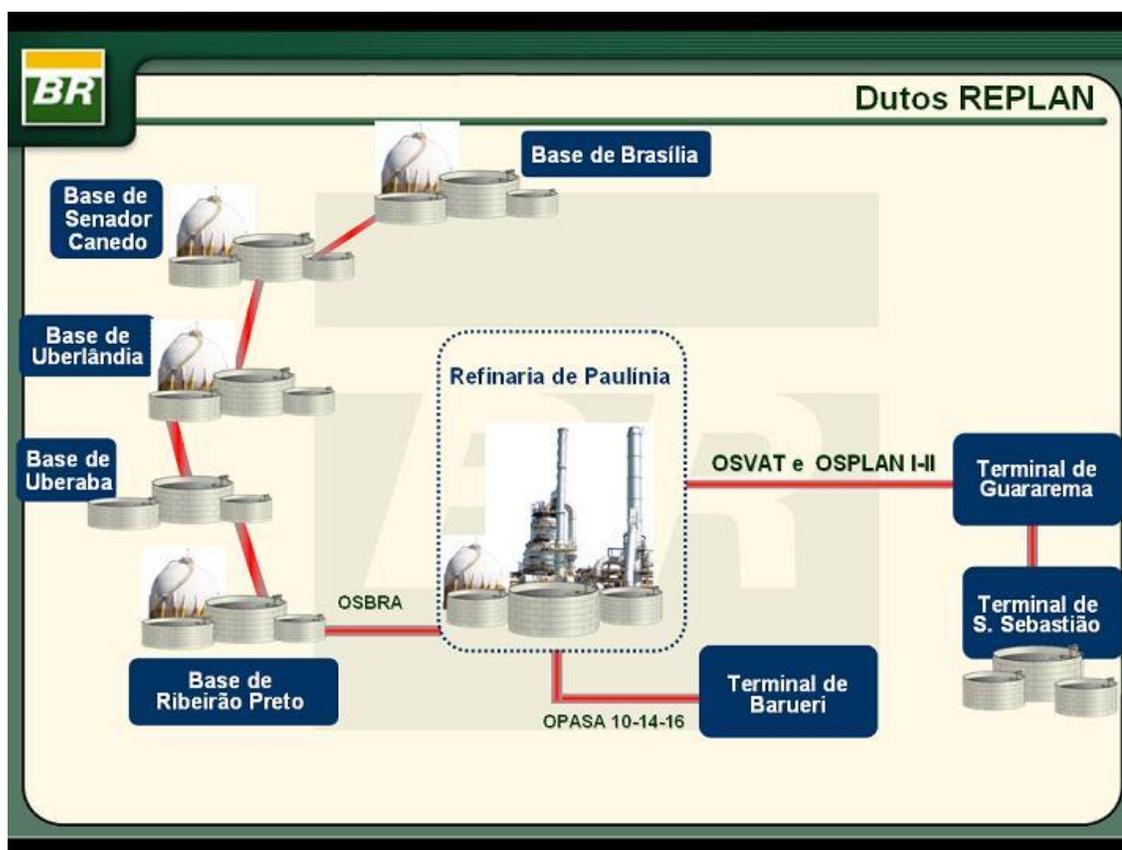


Figura 1.1: Representação esquemática dos principais polidutos que integram a rede de distribuição de combustíveis da Transpetro Distribuidora (Comunicação Pessoal).

Este poliduto tem origem na REPLAN (Refinaria do Planalto, em Paulínia/SP) e se estende até Brasília, passando pelos terminais de Ribeirão Preto, Uberaba, Uberlândia e Senador Canedo, no estado de Goiás. No trecho que se estende de Paulínia até Senador Canedo, também chamado de Trecho 1, o diâmetro da tubulação é de 20 polegadas; já no trecho subsequente, o Trecho 2, o diâmetro é de 12 polegadas. Em toda sua extensão, a OSBRA é composta por estações de bombeamento formadas por bombas centrífugas acionadas por motores elétricos.

Basicamente, nesta linha os produtos são introduzidos por bateladas sequenciais, isto é, cada produto é bombeado em sequência dentro da tubulação. Esta técnica gera produtos intermediários entre cada batelada, chamados de interfaces, que são posteriormente tratados (Kotchetkoff Neto, 2009).

Muitas das políticas e estratégias de gerenciamento de energia passam por quatro componentes: aumento da eficiência energética, diversificação da fonte de energia, suprimento assegurado e melhoramento do comportamento quanto à questão ambiental. O transporte de fluidos, como óleo e combustível pode ser feito de várias maneiras, como em grandes compartimentos (caminhões tanque) ou em tubulações, sendo que o transporte por tubulações apresenta menor custo e gasto energético mais eficiente. Apesar da alta eficiência do transporte por tubulações, uma considerável porcentagem dos custos totais vem do consumo de energia. Desta forma, a diminuição do consumo de energia no transporte de fluidos por tubulações torna se ainda mais atrativo (Cuenca *et al.* 2008). O consumo de energia pode ser reduzido se forem utilizados agentes redutores de atrito hidrodinâmico. Estes agentes são aditivos químicos que podem ser dissolvidos no fluido e, resultam na drástica diminuição do atrito.

1.2. O fenômeno da redução de atrito hidrodinâmico e sua importância

Sob certas condições de escoamento turbulento em tubulações, o transporte de soluções diluídas de polímeros requer uma menor energia específica consumida se comparada ao transporte de fluido sem polímero. Deste modo com soluções poliméricas, um gradiente de pressão mais baixo é requerido para manter uma mesma vazão, ou uma maior vazão pode ser atingida por um mesmo gradiente de pressão do fluido. Esta energia específica - ou atrito - reduzida é chamada de “Efeito Toms” depois que Toms (1948) reconheceu primeiramente este efeito. As observações de Toms tem sido confirmadas em muitos estudos, e em análises de gráficos de gradiente de pressão versus vazão, em diferentes sistemas polímero-solvente em fluxos turbulentos através de tubulações de vários diâmetros (Fabula, 1963 apud Virk *et al.* 1967; Savins, 1964; Metzner, 1964; Hershey & Zakin, 1965). Desses estudos, tem sido reconhecido que, qualitativamente, o alcance da redução de atrito aumenta com o aumento da vazão, aumento da massa molecular do polímero e aumento da concentração de polímero (até um determinado limite) (Virk *et al.* 1967). Portanto,

a redução do consumo de energia em tubulações pode ser compreendida no Efeito Toms que é a redução de atrito (RA) promovida por pequenas quantidades de polímeros de cadeia longa em um fluxo turbulento. Esses polímeros são chamados "aditivos redutores de atrito" (ARAs). Esses aditivos podem ser usados em tubulações cujo fluxo seja do tipo turbulento a fim de reduzir a energia empregada no escoamento desse fluido ou aumentar a sua vazão (Cuenca *et al.* 2008). A utilização de polímeros redutores de atrito pode ser uma alternativa viável à construção de mais estações de bombeio (Burguer *et al.* 1980).

Para um determinado polímero provocar o efeito da redução de atrito, ele deve possuir características específicas de massa molar, solubilidade no fluido a ser transportado, flexibilidade da cadeia. Sabe-se que efeitos térmicos e mecânicos podem degradar o polímero, que perde suas propriedades de reduzir o atrito. No caso da degradação mecânica, além do aditivo perder o efeito redutor de atrito, os componentes formados resultantes de sua quebra podem contaminar o fluido (Cuenca *et al.* 2008), podendo inutilizá-lo para sua aplicação final. Estudos em escala de laboratório são necessários para avaliação da efetividade de vários aditivos no efeito de redução de atrito e seus potenciais efeitos, como por exemplo, em refino de petróleo, no caso de aplicação de um agente redutor em bombeio de petróleo. Alguns aditivos para petróleo podem prover uma boa redução no atrito hidrodinâmico, porém tornam-se inutilizáveis caso sejam incompatíveis com processos de refino (Burguer *et al.* 1980). No caso de óleos, por exemplo, a adição de polímeros pode modificar a qualidade do óleo (Rabecki *et al.* 2006). Há estudos que indicam que a taxa de degradação de redutores de atrito em uma tubulação comercial é de até 3 ordens de grandeza mais baixas que em uma linha de pequeno comprimento (Horn *et al.* 1989) e seguem uma cinética de primeira ordem com taxa constante proporcional ao peso molecular do polímero (Basedow & Ebert, 1977).

A degradação mecânica do redutor de atrito oferece a vantagem de ser possível realizar o transporte de óleo a grandes distâncias com menor consumo energético ou maior vazão, sem alterar as especificações físico-químicas do óleo (Cuenca *et al.* 2008). No entanto, o menor consumo energético depende de certas adequações, tais como:

- a. a concentração do redutor de atrito no fluxo, que define a diminuição do fator de fricção;
- b. características do fluido;

- c. diâmetro da tubulação; e
- d. a velocidade do fluido no interior da tubulação.

As concentrações que conferem a máxima eficiência em redução de atrito encontram-se em uma faixa de 5 a 50 ppm de polímero (Burguer *et al.* 1980). O caso de maior sucesso de aplicação de redutores de atrito ocorreu na tubulação Trans-Alaska em 1979, onde 1287 km de tubulação ligam a Baía de Prudhoe até Valdez, ambas no Alasca (Figura 1.2). Cerca de 30% de redução de atrito é atingida; porém a cada 100 km se faz necessária a re-aplicação do redutor de atrito devido à perda de eficácia ocorrida pela degradação das macromoléculas. Neste período, houve muitos estudos sobre agentes redutores de atrito em grandes instalações (Burger *et al.* 1980; Horn *et al.* 1989; Motier *et al.* 1984 e 1996). Outra aplicação bastante satisfatória de aditivos redutores de atrito foi feita pela Companhia Logística de Hidrocarburos, na Espanha, onde cerca de 20 ppm foram injetados em uma tubulação de óleo diesel de 84 km, obtendo-se 45,3% de redução de atrito (Cuenca *et al.* 2008).



Figura 1.2: Mapa da tubulação Trans-Alaska construída entre 1974 e 1977.

A partir dos dados estudados por Burger *et al.* (1980), considerando uma vazão de petróleo de aproximadamente 7420 m³/h e uma concentração de injeção de aditivo de 20 ppm, em cada estação de injeção de deve-se utilizar 3,56 m³/dia de aditivo redutor de atrito (se considerarmos 12 estações ao longo da tubulação, serão necessários 42,74 m³/dia de aditivos). Apesar do volume de aditivos ser considerável, representa cerca de 0,02% do volume total escoado (sem adição de ARA), o que permite dizer que a técnica oferece vantagens compensadoras no custo total do processo. Atualmente, com a adição de ARA pode ser obtida uma vazão de até 1440000 bbl/dia (Alyeska Pipeline, 2011).

1.3. O início da redução de atrito – Efeito Toms

O início abrupto da redução de atrito sugere que uma condição necessária existe, provavelmente com relação à macromolécula, causando o Efeito Toms para o fluxo turbulento em questão, o qual deve ser satisfeita para a redução de atrito ocorrer. A *Hipótese do Início* (Virk *et al.* 1965), é uma tentativa de relacionar o diâmetro macromolecular (raio de giração do polímero) com a turbulência dissipativa.

Considerando, o volume excluído e a esfera equivalente hidrodinâmica, obtém-se que o diâmetro efetivo, D_M , e o enovelamento aleatório da macromolécula em uma solução diluída é aproximadamente duas vezes ao raio de giração, R_g (Figura 1.3), que é independente da concentração (Tanford, 1961). Uma solução polimérica é considerada diluída enquanto a conformação da molécula individual não é afetada pela sua vizinhança: isto corresponde, aproximadamente, a fração volumétrica de macromoléculas baseadas no diâmetro efetivo, sendo menor que aquele para o empacotamento esférico aleatório (Figura 1.4).

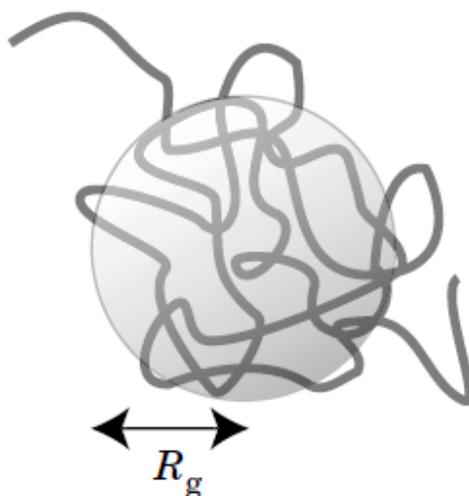


Figura 1.3: Cadeia polimérica com volume aproximado de uma esfera de raio R_g , que é o Raio de giração desta molécula (Teraoka, 2002).

Existem três regimes de concentração característicos para uma solução polimérica. No regime diluído, os novos poliméricos estão afastados, de forma que o raio de giração é o parâmetro característico que define a dimensão macromolecular. No ponto em que a concentração atinge o regime semi-diluído (caracterizado pela concentração c^*), os novos poliméricos começam a se tocar. O regime concentrado é caracterizado pelo grande entrelaçamento das cadeias dos polímeros (Figura 1.4)

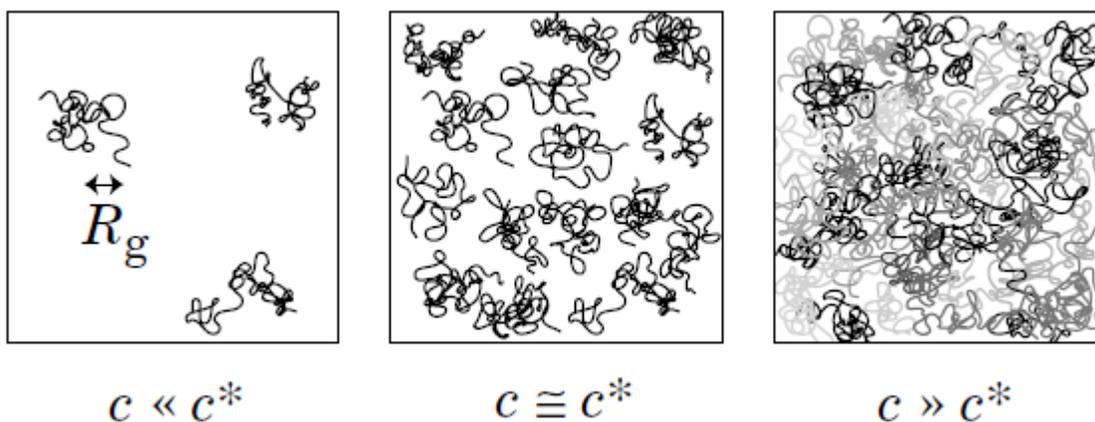


Figura 1.4: Regimes de concentração para soluções de polímeros lineares flexíveis: solução diluída ($c \ll c^*$), solução em overlap de concentração ($c \sim c^*$) e solução semidiluída ($c \gg c^*$), onde c^* é a concentração onde as macromoléculas começam a se tocar (Teraoka, 2002).

De acordo com o modelo de Rouse-Zimm (Rouse, 1953; Zimm, 1956), os movimentos dos segmentos poliméricos são regidos pelas interações hidrodinâmicas, sendo que através destes

movimentos, a macromolécula armazena energia elástica e posteriormente a dissipa como energia viscosa (o modelo é aplicável no regime diluído). Este modelo produz um espectro contínuo de tempos de relaxação, correspondente aos modos coordenados das vibrações moleculares. O tempo de relaxação está relacionado com o tempo médio para o novelo estirado retornar à configuração de “equilíbrio” (como resultado do movimento Browniano). O tempo de relaxação varia com o tamanho do novelo (representado pelo raio de giração). Para polímeros em um bom solvente (aquele que interage muito bem com os segmentos da cadeia polimérica), o tempo de relaxação mais longo (que é aquele que envolve o maior número de processos cooperativos dos segmentos do polímero) é dado pela relação de Flory (1953):

$$\frac{1}{t_{\text{relax}}} = \frac{kT}{\mu_0 R_g^3} \quad (1)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta da solução e μ_0 é a viscosidade do solvente. Para moléculas lineares flexíveis em um bom solvente, o raio de giração é dado por:

$$R_g \approx N^{3/5} a_m \quad (2)$$

onde N é o número de monômeros no novelo e a_m é o comprimento do monômero. O processo dinâmico de esticar e contrair as cadeias poliméricas é central no fenômeno de redução de atrito e, por esta razão os polímeros mais eficientes são os que são mais flexíveis. Foi demonstrado por Silva *et al.* (2009) que em meios apolares, aditivos redutores de atrito têm sua eficiência diminuída na presença de estruturas aromáticas como soluto. Assim, para a redução de atrito ocorrer, é importante o polímero estar na presença de um bom solvente, para que o maior número de processos cooperativos possam ocorrer.

A redução de atrito é um fenômeno energético e as taxas de dissipação e produção de energia turbulenta são conhecidas até uma determinada distância da parede ($y^+ \approx 10$; onde y^+ é a distância adimensional da parede). Portanto, o parâmetro escolhido para caracterizar a turbulência é a “dissipação do número de onda”, k_d , vindo do espectro de energia turbulenta fechado na parede e definido como o número de onda, onde a dissipação, $k^2 E(k)$, é máxima. Deste modo, k_d é a medida “fina” da escala de turbulência na qual a dissipação da energia de turbulência ocorre. É possível mostrar que (Laufer, 1954):

$$k_d = Ku_\tau / \nu \quad (3)$$

onde K é um fator, na ordem de 10^{-1} , que depende de y^+ , u_τ é a velocidade de fricção, $(\tau_w/\rho)^{0.5}$, e ν é a viscosidade cinemática.

A Hipótese do Início da redução de atrito determina que: o início da redução de atrito em um fluxo turbulento de solução polimérica diluída ocorre a um valor constante do produto $D_M k_d^*$, que é a razão de dimensões da macromolécula e a medida fina da escala de fluxo turbulento. Então, $D_M k_d^* = C$, que é a constante universal adimensional e o * indica que os valores são tomados no início do fenômeno. Usando a Equação 3 temos que

$$D_M \left(\frac{u_\tau^*}{\nu} \right) = C' \rightarrow C' = C/K \quad (4)$$

Para o qual, para uma dada série homóloga de polímero e solvente:

$$\left(\tau_w^* \right)^{1/2} = C'' / R_g \rightarrow C'' = 1/2 C' \nu \rho^{1/2} \quad (5)$$

A Hipótese do Início então apresenta as seguintes consequências (Virk *et al.* 1967):

1. Para um dado sistema molécula-solvente, $(\tau_w^*)^{0.5}$ pode ser independente da concentração em soluções diluídas e do diâmetro da tubulação;
2. Para qualquer tubulação, (u_τ^*/ν) pode variar com $(1/D_M)$, ou, para uma série homóloga de polímeros e solvente, $(\tau_w^*)^{0.5}$ pode variar inversamente com R_g .
3. A constante de início C, pode ser uma constante universal, independente do tubo, solvente ou macromolécula.

A Hipótese do Início é baseada também em escalas de comprimento. Analogamente pode-se postular uma hipótese baseada no tempo, substituindo o tempo de relaxação terminal da macromolécula (t_{relax}), por D_M e a frequência de dissipação por k_d . O termo t_{relax} pode ser calculado da teoria de viscoelasticidade linear (Zimm, 1956) e a frequência de dissipação pode ser relacionada por (u_τ^2/ν) , donde temos uma equação baseada no tempo:

$$t_{relax} \left(\frac{u_\tau^2}{\nu} \right) = C'_t \quad (6)$$

Os estudos sobre redução de atrito hidrodinâmico envolvem efeitos de viscosidade do solvente, velocidade do fluido e diâmetro da tubulação (Burger *et al.* 1980). Dados de redução de atrito por agentes redutores de atrito podem ser correlacionados pelo método de Hinkebein (1985), que é baseado nos dados originais e conceitos de Virk (1971 e 1975), que descreve e prevê o comportamento de um sistema fluido/redutor de atrito em um fluxo por uma tubulação. Os experimentos de Cuenca *et al.* (2008) concordam satisfatoriamente bem com o modelo proposto por Hinkebein.

Evidências experimentais indicam que a interação entre polímero e turbulência é mais afetada na região próxima à parede (Virk, 1971), de forma que outros estudos sugerem que a redução de atrito é dada pelas características da tensão de cisalhamento na parede (Virk *et al.* 1967). A magnitude da redução de atrito é relacionada então com a turbulência, e talvez o tamanho dos vórtices formados durante o escoamento seja de magnitude relacionada às características de tamanho da molécula polimérica, e ao seu raio de giração.

Fisicamente, o início da redução de atrito implica inicialmente na interação polímero-turbulência. A região onde há a interação polímero-turbulência responsável pela redução de atrito começa fora da subcamada viscosa. Para pequenas reduções de atrito, as condições na região próxima à parede do tubo são as mesmas que no escoamento Newtoniano, exceto por um aumento uniforme na velocidade média (Laufer, 1954).

Já Lumley (1969) mostra que a redução de atrito inicial, em relação ao tamanho da escala da turbulência, é da ordem de 1000 vezes o tamanho do raio de giração da molécula polimérica. Lumley (1969) e Landahl (1973 apud Burger *et al.* 1980) propuseram o fenômeno da alongação molecular. Ou seja, como um alongamento da molécula pode resultar em uma grande viscosidade elongacional, que é o que pode causar a redução de atrito na produção de energia turbulenta.

Outra correlação para redução de atrito com parâmetros de fluxo turbulento é a hipótese de escala de tempo. Lumley (1969) apresenta que a escala de tempo característica do fluxo turbulento, ν/U^2 (onde ν é a viscosidade cinemática e U é a velocidade do fluido), é da ordem de grandeza do tempo de relaxação molecular de um polímero monodisperso. Berman e George (1974) investigaram que a hipótese da escala de tempo relaciona-se com o início da redução de

atrito. Esses estudos suportam a idéia de que a redução de atrito está relacionada com a interação das moléculas poliméricas com os vórtices turbulentos. No entanto, o uso de polímeros polidispersos não mostra as mesmas constatações. Berman e George (1974) indicaram que o tempo de relaxação de polímeros polidispersos pode ser descrito por uma função de distribuição ao invés de um único valor. Conseqüentemente, com o aumento da taxa de cisalhamento (u_τ^2/ν) em um fluxo turbulento, uma maior parte da distribuição dos tempos de relaxação pode ser afetada, deste modo aumentando a redução de atrito.

1.4. Escalas de turbulência de Kolmogorov

Na natureza ou em sistemas de engenharia podem ser encontrados escoamentos turbulentos, os quais são caracterizados por movimentos aleatórios, tridimensionais, irregulares, transientes, caóticos e dissipativos. Escoamentos com alto número de Reynolds apresentam uma separação no tamanho das escalas turbulentas: as grandes e as pequenas escalas. As grandes escalas são diretamente influenciadas pela geometria do escoamento, governando globalmente, e pelo transporte e mistura de espécies. Já as pequenas escalas são dependentes apenas da taxa de energia que recebem das grandes escalas e da viscosidade do fluido, apresentando, assim, características locais e universais, independentes do escoamento global (Pope, 2000).

Dada essa separação entre as escalas turbulentas, verifica-se que as pequenas escalas são responsáveis pela dissipação da energia turbulenta produzida pelas grandes escalas. Esse transporte de energia é denominado *cascata de energia de Kolmogorov*. Neste modelo distinguem-se três regiões principais: produção de energia nas grandes escalas, transporte inercial nas escalas intermediárias e dissipação dessa energia pelas pequenas escalas, para escoamentos homogêneos e isotrópicos, em que o decaimento na região inercial é proporcional a $K^{-5/3}$, sendo $K = 2\pi l$ (l = ordem de tamanho do vórtice) (Fukumasu, 2010).

Em fluxos de soluções poliméricas diluídas em canais ou tubulações, efeitos de fronteira (parede) são importantes (Virk, 1965), mas experimentos recentes e trabalhos numéricos mostram que os polímeros afetam o fluxo turbulento também longe da parede. Em particular, De Angelis *et al.* (2005) estudou a modificação da cascata de turbulência induzida por polímeros em simulações numéricas de turbulência homogênea e isotrópica. Devido ao aumento da elasticidade dos

polímeros, o fluxo de energia da cascata turbulenta é parcialmente suprimida e transferida para graus de liberdade elásticos. Esta supressão permanece parcialmente equilibrada por largas faixas de valores de elasticidade. Como consequência, o fluxo de energia para as pequenas escalas permanece finito e a estatística de pequenas escalas, como a função de densidade de probabilidade de aceleração, conserva algumas características do escoamento Newtoniano (Berti et al, 2006).

O mecanismo no qual soluções diluídas de polímeros pode influenciar o fluxo turbulento é a extrema extensibilidade dos polímeros. Polímeros no equilíbrio encontram-se enrolados em formato de esfera de raio R_g (ou seja, estão enovelados). Na presença de um fluxo não-homogêneo, a molécula é deformada em uma estrutura alongada caracterizada por possuir um tamanho de ponta-a-ponta R , que pode ser significativamente maior que R_g . A deformação das moléculas é o resultado da competição entre o alongamento induzido por diferentes velocidades e da entropia de relaxação de polímeros para sua configuração de equilíbrio. Esta relaxação é linear, desde que a elongação seja pequena se comparada com a máxima extensão possível ($R \ll R_{max}$), e pode ser caracterizada pelo tempo de relaxação típico t_{relax} (Hinch, 1997).

Esses aspectos conduzem a um modelo simples o qual descreve o comportamento do polímero em um escoamento. Estes são descritos por esferas ligadas por molas, para representar os aspectos viscosos e elásticos, respectivamente. Desde que utilizado para polímeros onde seu tamanho típico seja menor que a escala de turbulência viscosa, o estiramento é devido ao gradiente de velocidade e a distância de ponta-a-ponta do polímero. No caso de soluções diluídas, a influência dos polímeros quando no estado enovelado é desprezível. Acima da fase de estiramento da molécula, os polímeros começam a afetar o escoamento. Este regime é caracterizado por uma grande elongação (Berti et al, 2006).

1.5. Teoria elástica de De Gennes

Metzner & Park (1964) notaram que propriedades não-Newtonianas de natureza puramente viscosa não produzem redução de atrito, e isso fez com que as atenções para a viscoelasticidade fossem deixadas para segundo plano. Joseph (1990) notou que esses efeitos podem ser elásticos pois os polímeros sempre atenuam a turbulência nas pequenas escalas, sugerindo a existência de um corte-de-escala natural pela velocidade da onda elástica. Tabor & De Gennes (1986) e De

Gennes (1990) sugerem que a transição do estiramento do novelo não ocorre em fluxo turbulento com flutuações randômicas de taxas de deformação, e que, se o estiramento for moderado, os polímeros provocam uma mudança mensurável na viscosidade do fluido. O maior efeito surge quando a energia elástica armazenada pelos polímeros que estão parcialmente estirados torna-se comparável à energia turbulenta. A energia elástica cresce com a diminuição do comprimento da escala de turbulência (devido ao aumento do estiramento característico da dinâmica de turbulência), considerando que a energia turbulenta diminui com o tamanho de escala. Quando estas duas energias tornam-se comparáveis, a energia elástica interfere no mecanismo usual de cascata turbulenta, sem permitir que se proceda todo o caminho da cascata de Kolmogorov. A idéia principal, no entanto, é que a ação não-linear que gera as pequenas escalas de turbulência encerra-se em alguma escala maior que a escala de Kolmogorov. Essa escala maior pode conduzir ao aumento de espessura da camada limite e assim reduzir o atrito (Sreenivasan & White, 2000).

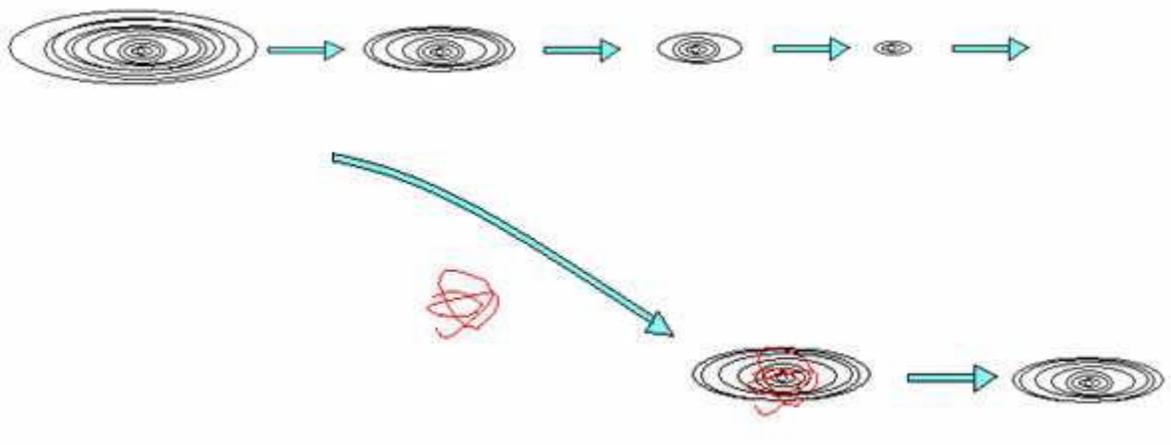


Figura 1.5: Representação esquemática do desenvolvimento de um vórtice e sua interação com a macromolécula (em vermelho), impedindo seu desenvolvimento (Bizotto, 2008).

Estiramentos parciais de moléculas poliméricas são talvez a regra – mesmo sob altas taxas de deformação, com o estiramento dependendo das condições iniciais do polímero (Smith & Chu, 1998). Esta observação corrobora uma das premissas da teoria elástica.

Considerando uma situação de flutuações turbulentas a altos números de Reynolds (como em um escoamento turbulento), para qualquer escala de comprimento r em um intervalo inercial

(um intervalo intermediário entre as grandes escalas e as pequenas escalas dissipativas de turbulência), pode-se obter uma escala de tempo, τ_r dada pela relação (Monin & Yaglom, 1975):

$$\tau_r = \left(\frac{r^2}{\varepsilon} \right)^{1/3} \quad (7)$$

onde ε é a média da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. Substituindo o parâmetro r pela escala de Kolmogorov $\eta \equiv (v/\varepsilon)^{1/2}$, obtém-se uma estimativa apropriada da dissipação desta escala.

Para concentrações bem pequenas do polímero a escala r será menor que η , e o polímero não afetará a turbulência. Assim, há uma concentração mínima de $r = \eta$, na qual o efeito do polímero começará a ser percebido no regime turbulento. Isso corresponde ao início da redução de atrito. O aumento da concentração de polímero pode induzir a interação entre novos vizinhos, pois a taxa de deformação turbulenta torna o mecanismo de estiramento inefetivo (Sreenivasan & White, 2000). Neste ponto, observa-se a diminuição do efeito redutor de atrito no escoamento turbulento.

1.6. Avaliação da redução de atrito em tubulações

Pode-se avaliar a eficiência da redução de atrito pelo decréscimo de energia empregada no escoamento, pelo aumento da capacidade de transporte na tubulação (Cuenca *et al.* 2008), pela redução no fator de fricção e pela diminuição do diferencial de pressão entre dois pontos (Burger *et al.* 1980; Motier *et al.* 1984 apud Cuenca *et al.* 2008). Uma forma usual de se medir a redução do atrito em uma tubulação é analisando os diferenciais de pressão observados entre dois pontos do escoamento, com e sem o redutor de atrito (Burger *et al.* 1980):

$$\%RA = \left[\frac{(\Delta p_{\text{fluido}} - \Delta p_{\text{ARA}})}{\Delta p_{\text{fluido}}} \right] \times 100 \quad (8)$$

onde Δp_{fluido} é a perda de carga no escoamento do fluido puro, sem redutor de atrito e Δp_{ARA} é a perda de carga do fluido mais o redutor de atrito, ambos em um mesmo número de Reynolds.

O aumento da concentração do redutor de atrito aumenta o percentual de redução de atrito implicando em um menor diferencial de pressão para um dado trecho de escoamento. Porém, no prolongamento do escoamento a porcentagem de RA torna-se menor, uma vez que há a

degradação mecânica do polímero. O fator de atrito de Darcy-Weisbach (Equação 9) também pode ser utilizado para a determinação da redução de atrito (Fox & McDonald, 2001, Larock et al, 2000), comparando-se o fator de fricção com e sem agente redutor de atrito:

$$f = \frac{2D}{\rho U^2} \frac{\Delta p}{L} \quad (9)$$

1.7. Modelos de escoamento em tubulações

A redução de atrito hidrodinâmico é sempre observada em um fluxo turbulento, que é definido em um “sentido de engenharia” onde o fluxo possui um número de Reynolds (Re) maior que o número de Reynolds crítico (Truong, 2001). Para tubulações,

$$Re = \frac{UD}{\nu} > 2300 \quad (10)$$

onde U, D e ν são a velocidade do fluido, diâmetro da tubulação e viscosidade cinemática.

Em tubos lisos, a redução de atrito obtida no escoamento de fluidos poliméricos é limitada por uma assíntota dependente de parâmetros do polímero (Virk *et al.* 1967) e há uma assíntota análoga para tubos rugosos. Em um gráfico log-log de fator de fricção f versus número de Reynolds Re, pode-se estudar a máxima redução de atrito utilizando polímeros. Os escoamentos então podem seguir os 3 modelos seguintes (Virk, 1971):

Lei de Poiseuille para fluxo laminar Newtoniano:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{Re \sqrt{f}}{16} \quad (11)$$

Lei de Prandtl-Kármán para fluxo turbulento Newtoniano em tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log(Re \sqrt{f}) - 0,4 \quad (12)$$

Correlação de Virk, Mickley e Smith (1970) para fluxo turbulento na assíntota máxima da redução de atrito em tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19,0 \log(Re \sqrt{f}) - 32,4 \quad (13)$$

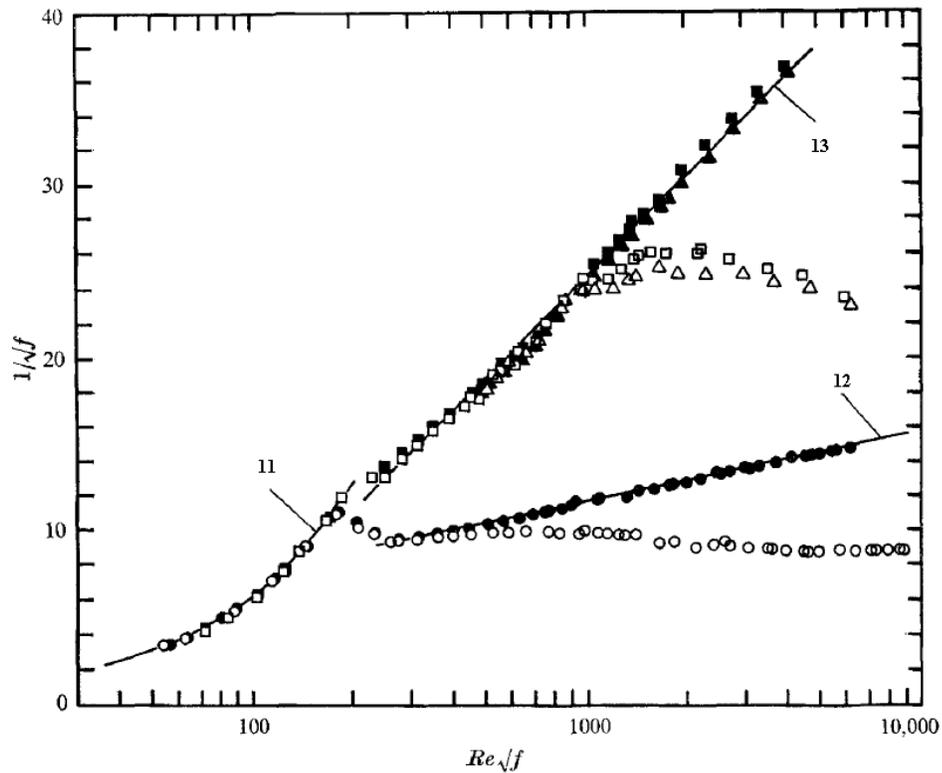


Figura 1.6: Máximas assíntotas de redução de atrito (Virk, 1971).

As linhas sólidas representam as equações indicadas no texto. Os pontos representam um experimento de Virk (1971), onde os pontos cheios referem-se a escoamento em tubos lisos, e os pontos vazados, a tubos rugosos. Os círculos referem-se ao solvente puro (água) e triângulos e quadrados referem-se a soluções a 100 ppm de polióxido de etileno e poliacrilamida, respectivamente. Os números indicam a equação utilizada para cada curva.

Para $Re < 2000$ a equação de Poiseuille descreve bem o fluxo. Para fluxo turbulento, $Re > 3000$, os fluidos (que podemos também chamar de solventes) e soluções poliméricas mostram similaridades com seus respectivos efeitos em tubos rugosos. Em tubos lisos, o solvente segue Prandtl-Kármán até $Re = 90000$ e solução polimérica (que produzem redução de atrito hidrodinâmico) segue a assíntota de máxima redução de atrito até $Re = 150000$. Para tubos rugosos, como visto na Figura 1.6 o solvente diverge em Re , sendo maior essa divergência com o aumento da razão R/ϵ_{rug} (ϵ_{rug} = rugosidade). Da mesma forma, a máxima redução de atrito as soluções poliméricas apresentam comportamento em tubos rugosos tal como em tubos lisos, mas com o aumento da fricção (Virk, 1971).

Para um dado par polímero-solvente, a tensão de cisalhamento na parede, τ_w^* , no ponto que marca o início da redução de atrito, é constante para uma larga faixa de concentração, independente do diâmetro do tubo. Além disso, a tensão de cisalhamento na parede diminui com o aumento da massa molar do polímero. Mais adiante, ocorre o fluxo turbulento com redução de atrito que é característico do fenômeno Toms; fluxo de soluções poliméricas (Q versus τ_w) tendem a apresentar maiores vazões em relação à mesma τ_w do solvente puro, indicando uma menor energia específica consumida. Para um dado polímero, o desvio em relação à curva do solvente aumenta com a concentração, mas eventualmente depois de uma certa concentração, esse desvio torna-se independente de concentração. Correspondentemente, a porcentagem de redução de atrito (RA), aumenta inicialmente com o aumento da concentração mas tende a ser constante em um valor de RA máximo, a altas concentrações. Duas assíntotas limitam um máximo de redução de atrito que podem ser atingido. Uma é a assíntota de alta concentração; de inclinação $N_p = (\partial \ln \tau_w / \partial \ln Q)$ é em função do polímero e aproxima-se da unidade com o aumento da massa molar. A outra assíntota é independente do polímero, e corresponde a condição além da qual a tensão de cisalhamento na parede não pode ser reduzida, e sua inclinação, (N_m), é aproximadamente $3/2$ (Virk *et al.* 1967).

A máxima assíntota de redução de atrito, de inclinação $N_m \approx 3/2$, é universal, independente da tubulação, polímero e concentração. O comportamento do solvente segue, para baixos números de Reynolds, a lei de Poiseuille (Equação 14) e para o fluxo turbulento pode-se assumir a Equação de Blasius (Equação 15) para tubo liso, ambas sendo independentes do polímero e universal em coordenadas Newtonianas, f (fator de atrito) e Re (número de Reynolds). Na Figura 1.7 pode-se observar um diagrama do fator de atrito em função do número de Reynolds com as retas para o fluxo laminar, turbulento e a assíntota de máxima redução de atrito (Equação 16). Entre esses limites, as linhas de fluxo dependem de f , Re , polímero e concentração.

$$f = 16Re^{-1} \quad \text{Laminar (Poiseuille)} \quad (14)$$

$$f = 0,079Re^{-0,25} \quad \text{Turbulento (Blasius)} \quad (15)$$

$$f = 0,42Re^{-0,55} \quad \text{Assíntota de máxima redução de atrito} \quad (16)$$

Estas relações estabelecem que a condição final de redução de atrito no Efeito Toms não é definida no escoamento laminar (Virk *et al.* 1967).

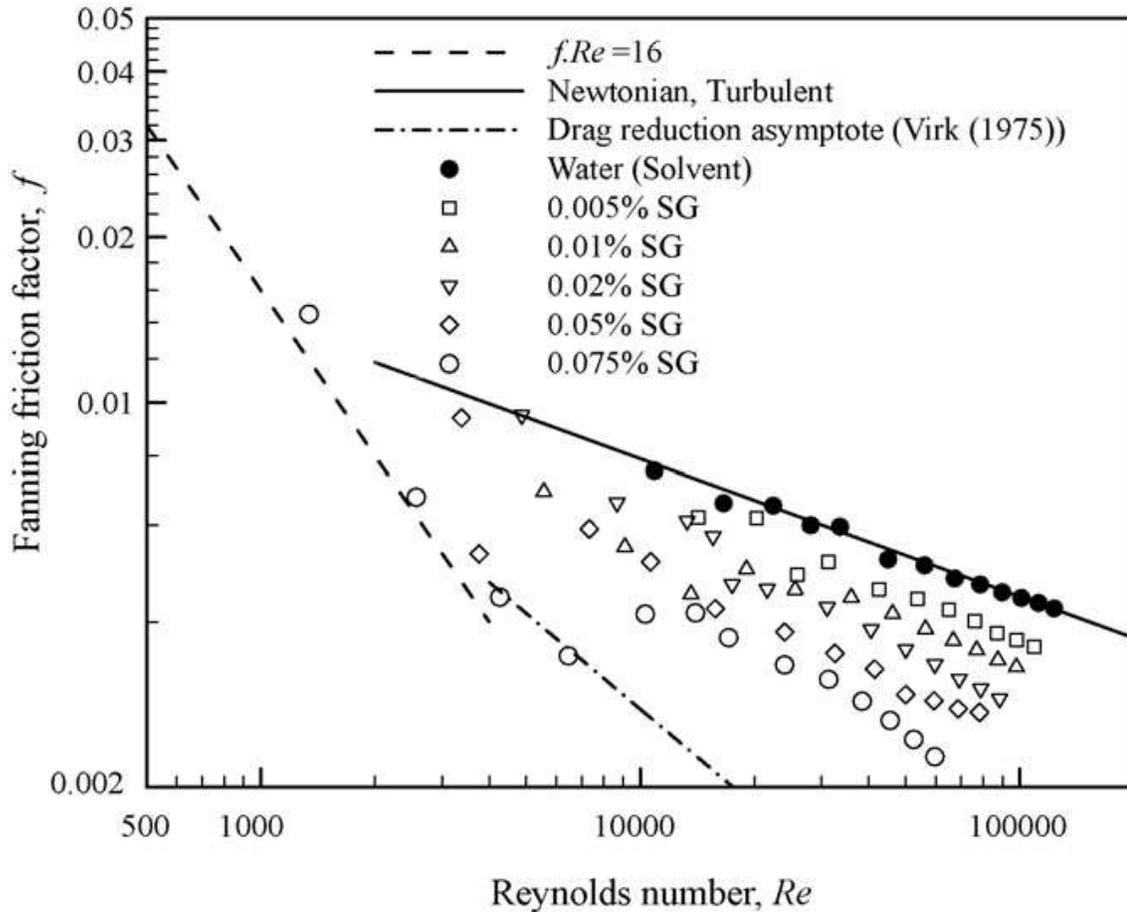


Figura 1.7: Diagrama de Moody extraído de Japper-Jaafar et al, 2009. Os pontos vazados representam a redução de atrito utilizando scleroglucan (polisacarídeo produzido pelo fungo *Sclerotium*), que também pode ser usado como um aditivo redutor de atrito.

1.8. Mudanças no fator de fricção na presença de um redutor de atrito

O comportamento de um sistema óleo/redutor de atrito pode ser analisado utilizando-se coordenadas de Prandtl-Kármán.

A Figura 1.8 mostra o comportamento de fluidos e a linha descontínua indica o comportamento de soluções poliméricas, para 3 diferentes comportamentos: Newtoniano (a), polimérico (b) e para condições de fluxo hidráulico em superfícies rugosas (c).

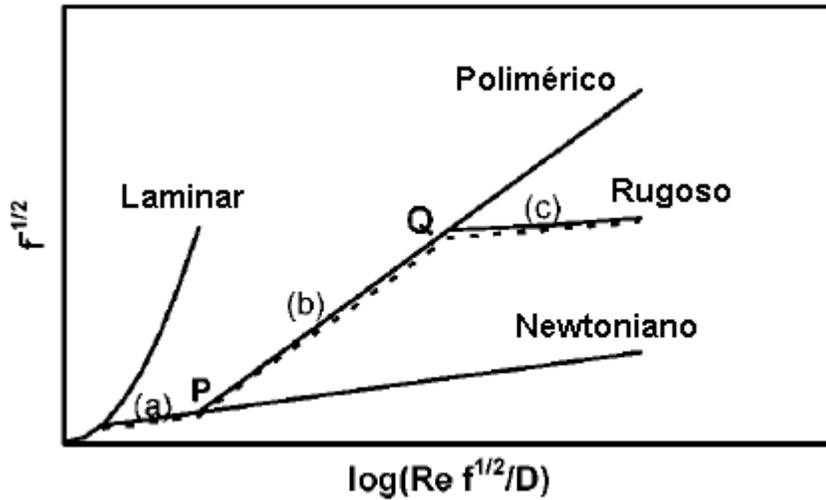


Figura 1.8: Modelo de parâmetros em coordenadas Prandtl-Karman (Hinkebein, 1985).

No comportamento Newtoniano, o polímero não tem influência no fator de fricção. Para determinados valores de número de Reynolds, o redutor de atrito começa a sofrer influência desse fator e o comportamento da solução polimérica torna-se diferente daquele observado para o óleo. Este valor é usualmente chamado de ponto de início ("onset point") e depende tanto do tipo do redutor de atrito quanto do óleo que está sendo escoado (ponto P na Figura 1.8) (Cuenca *et al.* 2008).

Já para o comportamento polimérico, a redução do fator de fricção como consequência da adição do polímero pode ser observada. A inclinação desta curva depende do tipo de redutor de atrito e da concentração deste no fluido (Virk, 1975), o que permite estimar a eficiência do redutor de atrito.

Por fim, na região de superfícies rugosas, acima de determinados valores de número de Reynolds, o fator de fricção torna se aproximadamente constante, independente do valor de Reynolds. O ponto Q na Figura 1.8 indica o início deste comportamento e o número de Reynolds referente ao ponto Q é dado por (Hinkebein, 1985):

$$\left(\frac{Re \sqrt{f}}{D} \right)_{es} = \frac{2\sqrt{2}k_{es}^+}{\epsilon_{rug}} \quad (17)$$

onde ε_{rug} a rugosidade na tubulação e $k_{\text{es+}}$ é a máxima rugosidade adimensional para o regime efetivamente liso, que tem o valor aproximado de 50 para uma grande variedade de condições (Virk, 1971).

Nos limites da região (b) (Figura 1.8) o comportamento polimérico é caracterizado por uma inclinação diferente da observada para a região do comportamento Newtoniano. Essa inclinação é definida com relação ao comportamento Newtoniano. Assim, podemos ter a seguinte equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{\text{ARA}}}} - \frac{1}{\sqrt{f_{\text{fluido}}}} = \delta \log \frac{\left(\frac{\text{Re} \sqrt{f}}{D} \right)}{\left(\frac{\text{Re} \sqrt{f}}{D} \right)_c} \quad (18)$$

onde δ é a diferença entre as inclinações das linhas correspondentes ao fluido a ser escoado com ou sem o redutor de atrito (Cuenca *et al.* 2008).

As estimativas tanto de δ quanto de $\log(\text{Re}\sqrt{f}/D)_c$ mostram a influência do redutor de atrito no fator de fricção do escoamento. Nota-se que o efeito da redução de atrito só ocorre sobre o fluxo turbulento.

1.9. Redução de atrito em reômetro – alternativa aos testes em tubulação

Um vasto número de estudos experimentais tem sido realizados a fim de caracterizar vários aspectos da redução de atrito induzida por polímeros. Muitos destes estudos são realizados utilizando sistemas de tubulações, mas também há estudos sobre redução de atrito utilizando reômetros não-comerciais com geometria axial (Kalashnikov, 1998). Sistemas de tubulações fornecem resultados quantitativos, mas são sistemas experimentais que exigem um volume muito grande de material e tempo consumidos para se realizar as medidas (Nakken *et al.* 2001).

Medir a magnitude da redução de atrito hidrodinâmico é relativamente fácil, considerando a magnitude do efeito (Bizotto *et al.* 2011). Geralmente as medidas de redução de atrito são feitas em tubos capilares (Kulik, 2001), contendo dois transdutores de pressão colocados em pontos distintos da tubulação (Figura 1.9), que medem diferenças de pressão (P_1 e P_2). Assim, a magnitude da redução de atrito é obtida da mesma forma que em um sistema de tubulação (Equação 8).

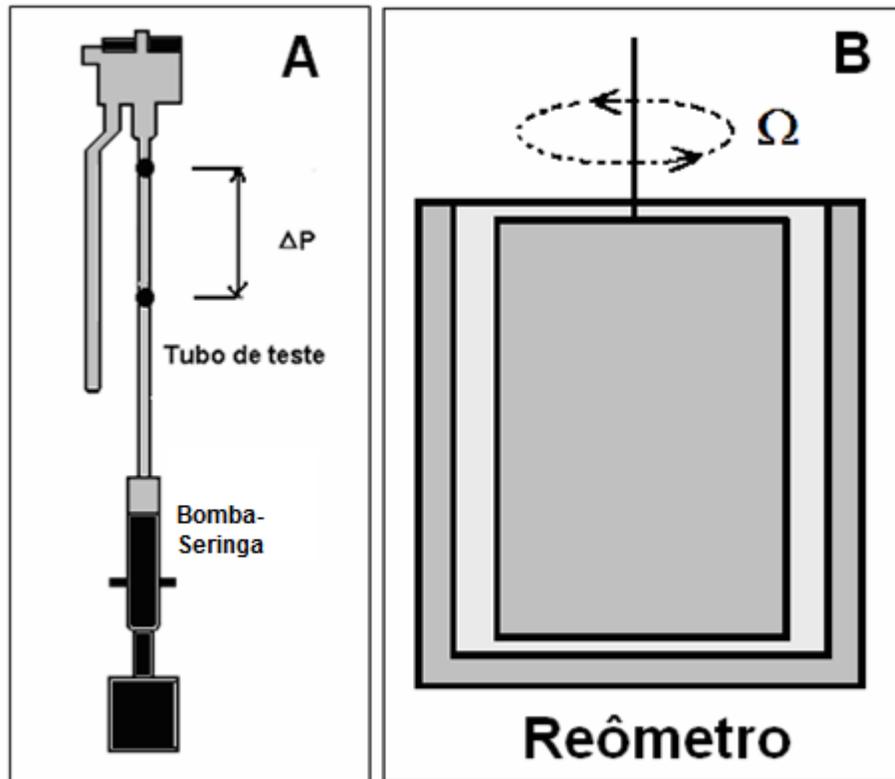


Figura 1.9: Esquemas de equipamentos usados para medida da redução de atrito hidrodinâmico: A - Reômetro capilar e B - cela de Couette usada em um reômetro rotacional (Bizotto *et al.* 2011).

Muitos dos reômetros comerciais com geometria axial podem ser utilizados para estudos qualitativos de redução de atrito. Além disso, reômetros são em geral compactos, simples de se operar e requerem pequenas quantidades de amostra (Nakken *et al.* 2001; Bizotto, 2008).

A técnica utilizando uma cela do tipo Couette (Figura 1.9 B) é baseada em um torque aplicado por um motor de reômetro que mantém o fluido (com e sem aditivo) em rotação dentro da cela Couette. Em um fluxo turbulento, o torque é menor para o fluido contendo o aditivo redutor de atrito (Silva *et al.* 2009). A amostra de fluido preenche o compartimento que fica entre os dois cilindros e a redução de atrito é quantificada em função do torque requerido para manter certa velocidade angular do rotor imerso no fluido. Assim, a porcentagem de redução de atrito é definida pela Equação 19:

$$\%RA = \left(\frac{M_s - M_p}{M_s} \right)_{\Omega} \times 100 \quad (19)$$

onde M_S e M_P são o torque do fluido sem e com aditivo redutor de atrito respectivamente.

Um diagrama típico obtido quando se usa esta técnica está apresentado na Figura 1.10, na qual se mede o torque aplicado no cilindro rotatório, para mantê-lo rodando em determinada rotação. A técnica pode ser utilizada para estudar o efeito comparativo da cinética de degradação mecânica de polímeros (Bizotto & Sabadini, 2008) e para selecionar agentes redutores de atrito e suas concentrações ótimas, para amostras de petróleo (Silva *et al.* 2009).

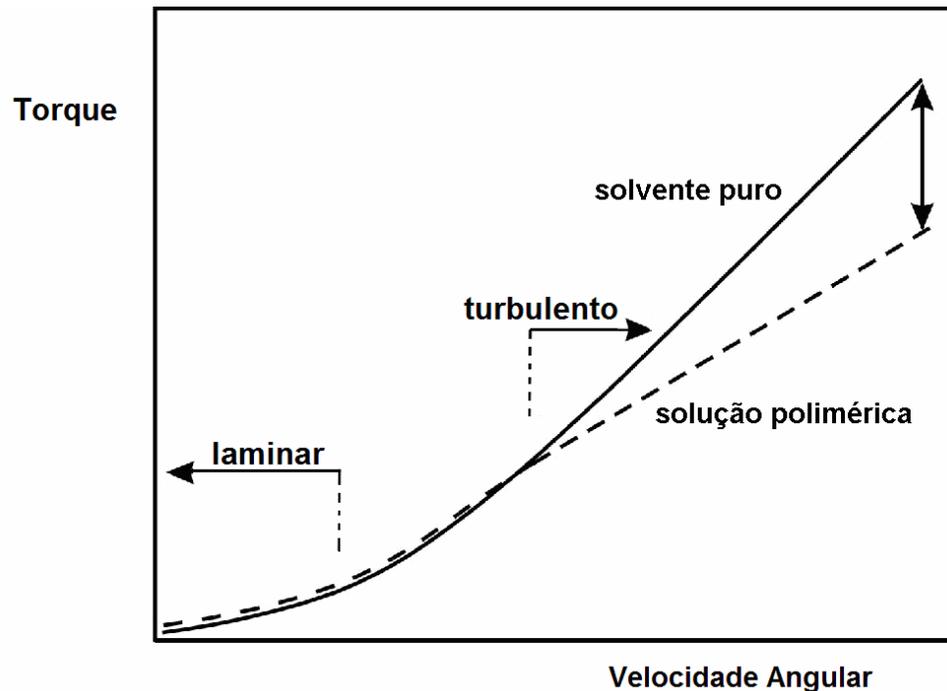


Figura 1.10: Curva de fluxo (torque em função da velocidade angular) para o solvente puro (linha contínua) e para o solvente contendo um polímero redutor de atrito (linha tracejada): Gráfico genérico mostrando o comportamento reológico obtido nos estudos usando o sistema de cela Couette para a determinação da porcentagem de redução de atrito (Bizotto et al, 2011).

1.10. Objetivos

Esta dissertação teve como principais objetivos a compreensão do fenômeno de redução de atrito hidrodinâmico em escoamento turbulento tanto em cela do tipo Couette quanto no escoamento em tubulações e o estudo da relação entre esses dois tipos de experimentos. Para isto, foram avaliados os desempenhos de dois agentes redutores de atrito (ARA's) comerciais que, injetados em ínfimas proporções (da ordem de ppm) em uma tubulação de escoamento de diesel,

puderam causar significativa diminuição em sua tensão de cisalhamento turbulenta, reduzindo a queda de pressão por atrito durante seu escoamento no interior de um tubo. Apesar dos experimentos em reômetro terem maior rapidez, controle de variáveis e menor consumo de materiais, o escoamento no interior da cela Couette é diferente em relação ao escoamento em tubulações, devido ao alto efeito de parede presente neste tipo de escoamento. No entanto, os testes em tubulações são mais próximos das demandas reais, sendo assim importantes para o entendimento do fenômeno. Em outras palavras, busca-se neste trabalho, uma comparação sistemática para estudos de redução de atrito de um mesmo sistema (diesel mais agente redutor de atrito), mas usando as duas técnicas. Procura-se desta forma, aliar a facilidade experimental de uma das técnicas, com os aspectos hidrodinâmicos reais da outra.

O presente trabalho compõe-se, de cinco capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1: a introdução do trabalho, com a revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados à redução de atrito hidrodinâmico no escoamento em tubulações e em reômetro e também trabalhos sobre o mecanismo de atuação da redução de atrito hidrodinâmico em escala molecular (já apresentado).

Capítulo 2: descrição do procedimento experimental, apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos nos testes em reômetro.

Capítulo 3: descrição da montagem do sistema de tubulação, ajustes necessários na etapa pós-construção e descrição do procedimento experimental adotado.

Capítulo 4: apresentação e discussão dos resultados obtidos no sistema de tubulação e comparação com os resultados obtidos em reômetro.

Capítulo 5: as principais conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. EXPERIMENTOS DE REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO EM REÔMETRO

2.1. Preparação das amostras de aditivo em óleo diesel

Inicialmente, para os experimentos feitos em reômetro, foi preparada uma solução estoque de cada aditivo redutor de atrito comercial (A e B) em óleo diesel metropolitano S-500. Essas soluções estoque foram mantidas sob agitação branda até a completa dissolução do aditivo, e utilizadas para preparar as soluções finais. Todas as soluções foram preparadas por gravimetria, e mantidas num banho termostático a 25°C. Os estudos foram realizados em uma faixa de concentração de aditivos inicialmente entre 0 e 100 ppm, e em um segundo momento entre 0 e 10 ppm.

Não é do conhecimento a constituição química dos ARA's por se tratar de produtos comerciais. Assim, vamos denominar os produtos como “Aditivo A” e “Aditivo B”. É de conhecimento geral que os aditivos apresentam em sua formulação poliolefinas de elevada massa molar.

2.2. Reômetro utilizado nos experimentos

As medidas reológicas foram realizadas em um reômetro rotacional RheoStress1 (Haake Instruments) equipado com uma cela do tipo Couette, modelo Z34Ti-DIN 53019/ISSO 3219, cujas medidas são: comprimento do cilindro $L_c = 51$ mm, raio do cilindro interno $R_i = 17,00$ mm, raio do cilindro externo $R_a = 18,44$ mm e distância entre rotor e fundo do copo $a = 7,2$ mm (Figura 2.1). Neste tipo de geometria, o copo (porta-amostra) mantém-se estacionário enquanto o cilindro interno gira sobre a amostra. O volume de amostra utilizado nos experimentos foi de 40,1 mL (definido pelo conjunto rotor/copo).

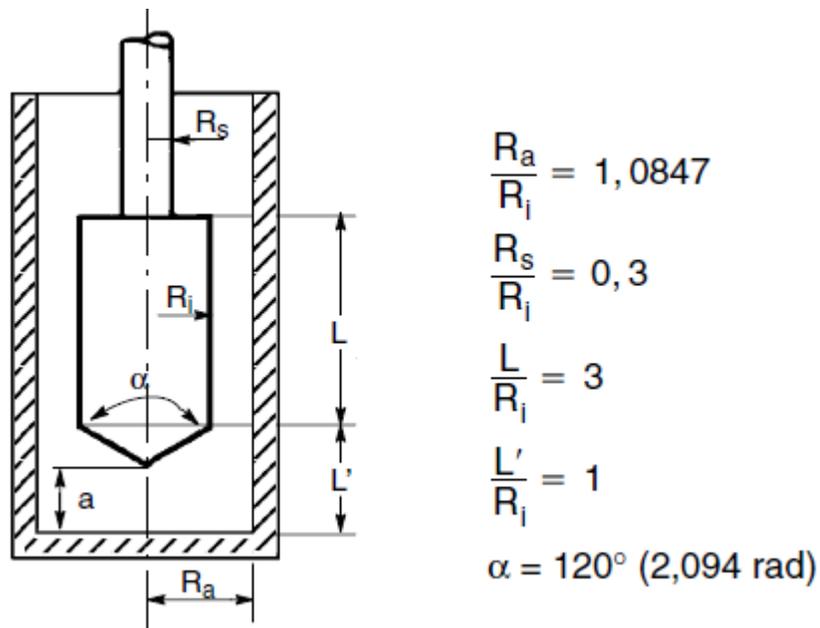


Figura 2.1: Esquema da cela do tipo Couette utilizada nos experimentos de redução de atrito em reômetro (Thermo Haake, 2003).

A temperatura foi mantida fixa em $25,0 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (exceto para os experimentos de efeito da temperatura, onde foram utilizadas temperaturas de 20 a $40 \text{ }^\circ\text{C}$) através de um banho externo termostaticado (Haake DC30). As curvas de fluxo foram obtidas em uma faixa de 0 a 2478 rpm. Para os experimentos de degradação mecânica as amostras foram submetidas à rotação constante de 2000 rpm durante 10, 20 e 30 minutos. Uma imagem do reômetro pode ser vista na Figura 2.2.



Figura 2.2: Fotografia do reômetro utilizado com a cela tipo Couette acoplada.

2.3. Reprodutibilidade dos testes em reômetro

Para testar a reprodutibilidade do reômetro foram preparadas 5 soluções independentes de cada um dos aditivos estudados com uma concentração de $(6,991 \pm 0,003)$ ppm para o Aditivo A e $(7,0041 \pm 0,0007)$ ppm para o Aditivo B. Os resultados de redução de atrito obtidos estão na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Porcentagem de redução de atrito em reômetro, para 5 soluções de 7 ppm para os aditivos A e B.

Número Amostra	RA (%)	
	Aditivo A	Aditivo B
1	11,7	16,4
2	11,6	16,9
3	12,5	16,2
4	11,3	16,9
5	11,2	16,2
Média:	11,7	16,5
Desvio Padrão:	0,5	0,4

Observa-se que o desvio das medidas de redução de atrito obtidas pelo reômetro representa até meio ponto percentual, o que mostra uma precisão bastante satisfatória. A concentração de 7 ppm foi escolhida por apresentar um melhor desempenho de redução de atrito nos ensaios preliminares.

Comercialmente, a composição do diesel varia muito, devido a diferentes origens do petróleo utilizado como matéria-prima e diferentes processos de refino (Braun *et al.* 2003). Além disso, o envelhecimento do diesel causa a formação de água e “borra”, que são microorganismos que se alimentam de óleo diesel (Lobo, 2002). Por esta razão, medidas de porcentagem de redução de atrito foram feitas em três ocasiões diferentes. Neste caso as soluções foram preparadas com a mesma amostra de diesel, com o aditivo A, mas com diesel envelhecido por mais de um mês entre uma preparação e outra. A Figura 2.3 mostra o efeito desta variação de composição na medida de redução de atrito.

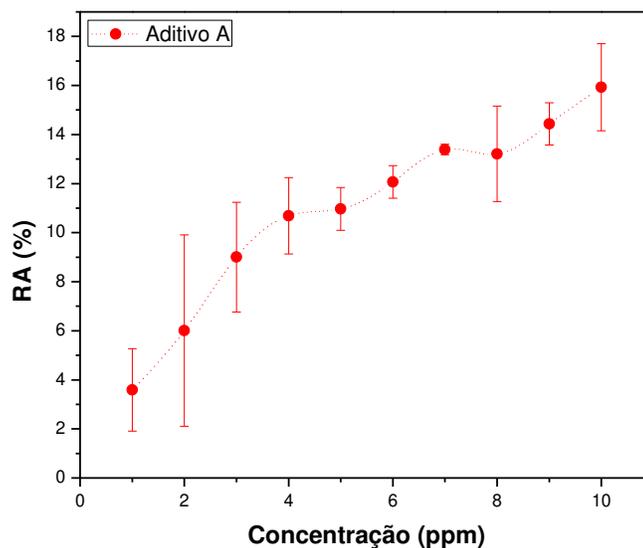


Figura 2.3: Redução de atrito do Aditivo A em óleo diesel em concentrações de 1 a 10 ppm a 2478 rpm. Dados são referentes a triplicata.

Nesse estudo, observa-se que para concentrações mais baixas, o desvio é maior do que para concentrações maiores. Também é observado uma diferença de porcentagem de RA de até 60% para 2 ppm de concentração. No entanto, como o erro do equipamento está em 0,5%, a flutuação das medidas foi, neste caso, atribuída ao envelhecimento do diesel e a variações no preparo das soluções.

2.4. Concentração ótima de aditivos redutores de atrito em reômetro

Uma curva de fluxo pode ser obtida submetendo uma amostra ao cisalhamento em uma determinada faixa de velocidade angular e medindo os torques correspondentes para diversas concentrações, tal como mostrado na Figura 2.4.

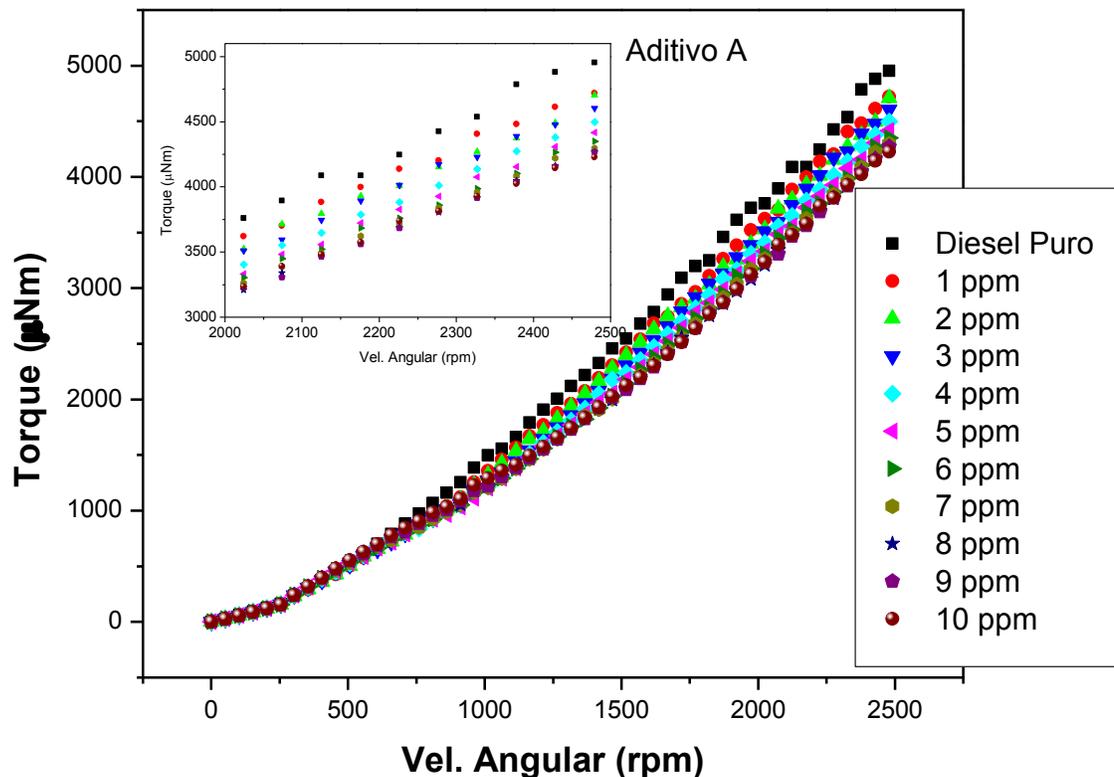


Figura 2.4: Variação do torque em função da velocidade angular para soluções de diesel S500 com o agente redutor de atrito A, em concentrações variando de 0 a 10 ppm. O detalhe da figura é uma ampliação da parte final do gráfico.

A variação linear crescente do torque com a velocidade angular observada nos primeiros 250 rpm da curva caracteriza o regime de fluxo laminar e é coincidente tanto para a amostra de óleo diesel puro quanto para as amostras aditivadas. Após a faixa de fluxo laminar, o aumento no torque aplicado é devido aos vórtices de Taylor, que consistem de dois pares de vórtices em contra-rotação, sobrepostos com o fluxo Couette (Taylor, 1936; Groisman e Steinberg, 1996). Estes vórtices dissipam energia, resultando num aumento do torque (Macosko, 1994). Porém, os vórtices de Taylor são estruturas macroscópicas, organizadas, onde o agente redutor de atrito não atua (Bizotto, 2008). Os vórtices de Taylor são estáveis até o começo da turbulência, que se dá com a formação de vórtices menores, descritos pela cascata de Kolmogorov, e a interação com agente redutor de atrito modifica o desenvolvimento dos mesmos (Pipe & Monkewitz, 2006)

Pode-se observar na Figura 2.4 que este regime de fluxo se prolonga até uma faixa de 500 a 700 rpm (quanto maior a concentração de aditivo, maior é a região dos vórtices de Taylor) e após esse ponto, tem-se o desenvolvimento do fluxo turbulento. A presença do agente redutor de atrito modifica o padrão de fluxo observado para o óleo diesel puro, diminuindo o esforço (torque) feito pelo rotor em uma dada velocidade angular.

Assim, na velocidade angular mais alta, observa-se que a partir de uma concentração de 2 ppm do Aditivo A, há uma redução de atrito de aproximadamente 5%, sendo que para 7 ppm obtém-se 13% de redução. Concentrações de aditivos mais altas que estas não apresentam um aumento significativo da porcentagem de redução de atrito, sendo que o torque pode inclusive começar a aumentar, devido ao aumento da viscosidade do diesel aditivado.

A mesma avaliação foi feita para as soluções de Aditivo B em diesel, nas mesmas condições. Na Figura 2.5, observa-se que até uma velocidade angular de aproximadamente 1160 rpm, as soluções com o Aditivo B apresentam um torque maior que o torque do diesel puro, a uma mesma velocidade angular. Isso se deve ao fato de que quando o fluxo é laminar, as forças viscosas se sobrepõem às forças inerciais e, como as viscosidades de cisalhamento das soluções de Aditivo B são maiores do que a viscosidade de cisalhamento do diesel puro, o torque (esforço) necessário para as soluções aditivadas manterem a mesma rotação é maior do que para diesel puro.

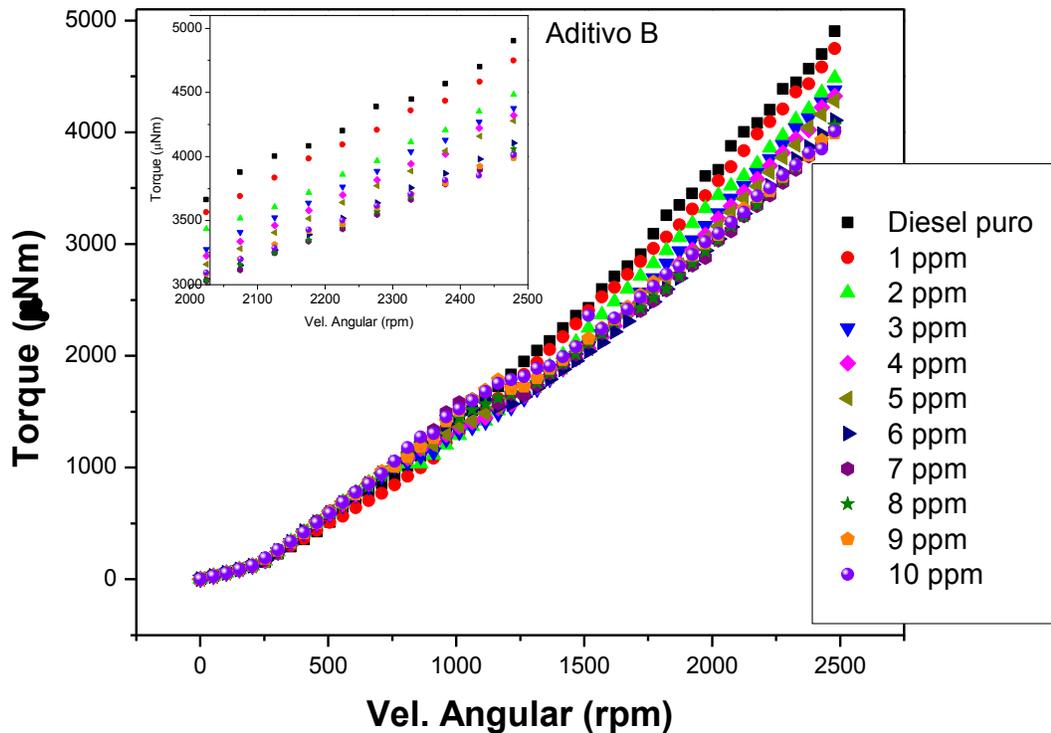


Figura 2.5: Variação do torque em função da velocidade angular para soluções de diesel com o Aditivo B em concentrações variando de 0 a 10 ppm. O detalhe da figura é uma ampliação da parte final do gráfico.

A porcentagem de redução de atrito para os dois aditivos pode ser resumida na Figura 2.6. Para os dois aditivos pode se notar a tendência de formação de um patamar, indicando que maiores concentrações do aditivo não afetam a magnitude do fenômeno. Na região do patamar, o máximo de redução de atrito atingido é de aproximadamente 14% e 18% para os aditivos A e B respectivamente. Assim, de acordo com este resultado, pode-se concluir que o aditivo B tem um rendimento um pouco superior ao do aditivo A. Se concentrações maiores de aditivos são utilizadas, então a porcentagem de redução de atrito medida no reômetro pode diminuir, causada pelo aumento da viscosidade das soluções de diesel aditivadas.

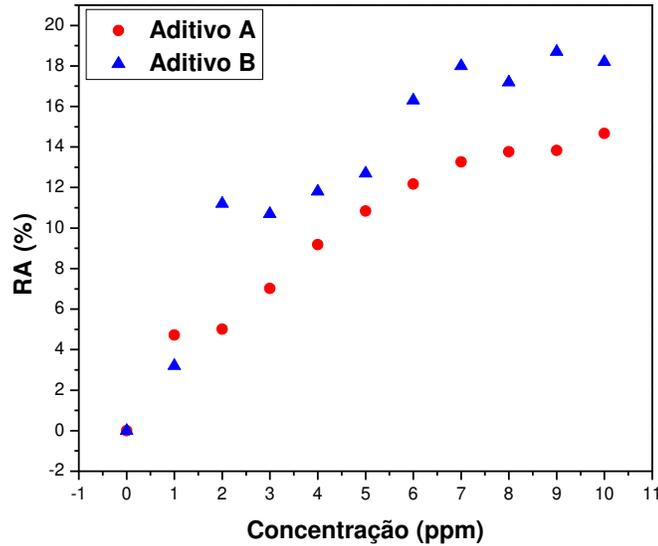


Figura 2.6: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração dos Aditivos A e B em óleo diesel. A velocidade angular foi de 2480 rpm.

A fim de comparar o desempenho em redução de atrito para cada um dos aditivos estudados, os estudos sobre efeito de temperatura na redução de atrito e degradação dos aditivos foram realizados a uma concentração de 7 ppm. Apesar de se obter a mais alta porcentagem de redução de atrito nas concentrações de 10 e 9 ppm (para os Aditivos A e B respectivamente), a concentração de 7 ppm foi escolhida por proporcionar valores de redução de atrito muito próximo àqueles observados a concentrações mais altas.

2.5. Redução de atrito no reômetro em termos de número de Reynolds

As curvas de fluxo, antes expressas em termos de velocidade angular (Figura 2.4 e Figura 2.5), podem ser observadas agora em função do número de Reynolds (Figura 2.7), para ambos os aditivos na concentração de 7 ppm. O número de Reynolds (Re) para o fluxo produzido em uma cela do tipo Couette pode ser determinado usando a Equação (20) (Goodwin e Hughes, 2000):

$$Re \approx \frac{\dot{\gamma}(R_a - R_i)^2 \rho}{\mu} \quad (20)$$

onde $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, R_a e R_i são respectivamente os raios externo e interno dos cilindros, ρ é a densidade e μ é a viscosidade do óleo diesel. De acordo com Goodwin e Hughes (2000), enquanto para fluxo em tubulações o Reynolds que marca a transição entre fluxo laminar e turbulento é de 3000, para cela Couette esse valor cai para 300. No entanto, esses valores são dependentes de uma série de fatores experimentais, como por exemplo a relação entre os raios interno e externo na cela Couette e a rugosidade nas paredes.

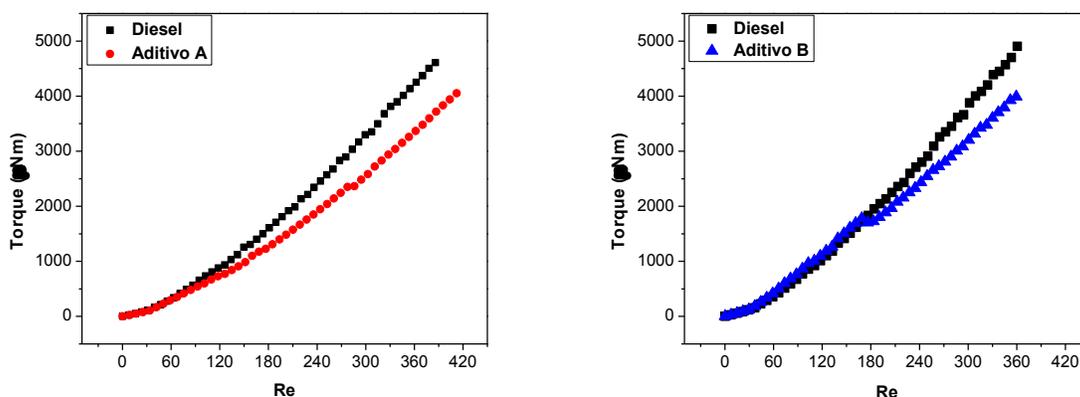


Figura 2.7: Curva de fluxo – Torque em função do número de Reynolds para o óleo diesel sem e com 7 ppm de Aditivo A (esquerda) e Aditivo B (direita).

Observa-se que para o Aditivo A o regime laminar prolonga-se até $Re \approx 37$, e que o regime onde atuam os vórtices de Taylor vão até $Re \approx 83$. Após esse ponto, inicia-se o regime turbulento e a redução de atrito é evidenciada. Para o Aditivo B fica evidente o ponto onde as forças inerciais vencem as forças viscosas. Pode-se observar que, para a faixa de Reynolds estudada, a magnitude da redução de atrito é mediana (Figura 2.8), e isto se deve ao fato de que os números de Reynolds que podem ser atingidos no reômetro, representam situações ainda de moderada turbulência.

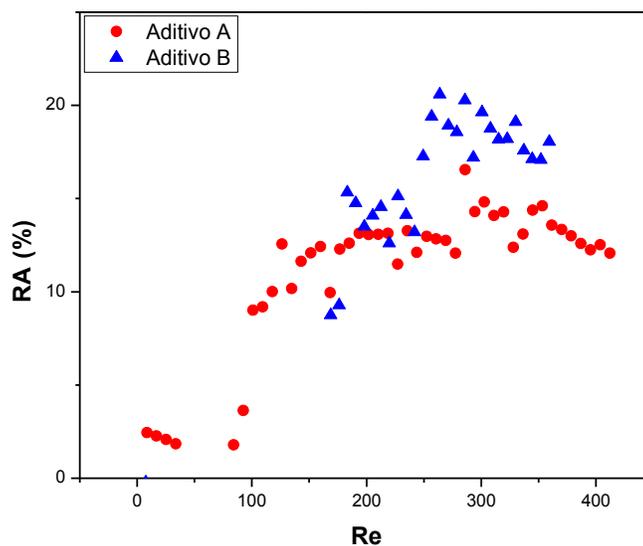


Figura 2.8: Redução de atrito em função do número de Reynolds. Estão representados somente os dados com RA maiores que zero.

2.6. Efeito da temperatura na redução de atrito estudada no reômetro

Experimentos para avaliar o efeito da temperatura foram feitos no reômetro para diesel sem e com 7 ppm de aditivo redutor de atrito A e B, em temperaturas de 20 a 40 °C (Figura 2.9), mantendo-se a rotação em 2480 rpm.

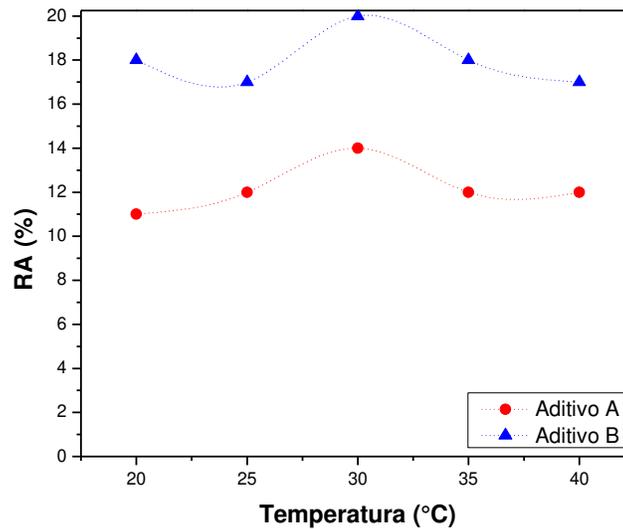


Figura 2.9: Porcentagens de redução de atrito em função da temperatura em reômetro na concentração de 7 ppm.

Observa-se na Figura 2.9 que a variação de temperatura não exerce uma grande influência nos resultados de redução de atrito na concentração estudada, para ambos os aditivos. Isto mostra que os resultados obtidos nos experimentos em tubulação não devem ser afetados pela temperatura. Esta informação é importante, pois o sistema de tubulação em estudo não permite o controle desta variável. Nota-se que em ambos os aditivos, a porcentagem de redução de atrito mostra-se um pouco maior na temperatura de 30°C, porém esta diferença não é significativa.

2.7. Degradação mecânica do agente redutor de atrito em reômetro

Experimentos para avaliar a estabilidade mecânica do aditivo foram feitos em reômetro com diesel contendo 7 ppm do aditivo A. O mesmo padrão de cisalhamento foi utilizado para o diesel puro, de forma que uma comparação direta entre os resultados pudesse ser feita. Nos experimentos, a temperatura foi mantida em 25 °C, em uma rotação constante de 2000 rpm por um tempo de 10, 20 e 30 minutos, sendo que os experimentos a 30 minutos foram realizados em duplicata (Figura 2.10).

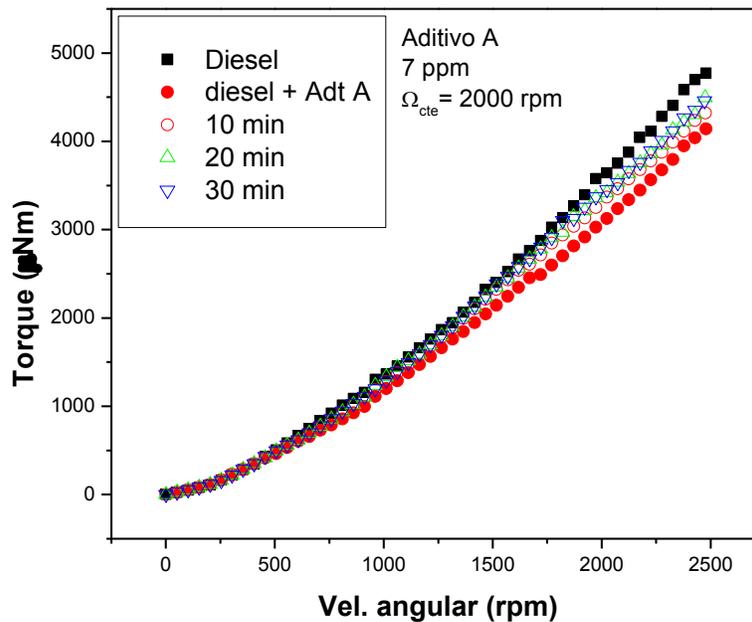


Figura 2.10: Curva de Fluxo: torque em função da velocidade angular para solução de 7 ppm do aditivo A. As curvas de pontos cheios são antes do cisalhamento constante a 2000 rpm. As curvas de pontos vazados são as curvas de fluxo obtidas após o tempo indicado em que a solução foi submetida ao cisalhamento constante.

À medida que o tempo de cisalhamento aumenta, a porcentagem de redução de atrito diminui, pois o torque da solução aditivada tende ao torque do diesel puro. Isto resulta em uma diminuição de até 40% em média do valor de redução de atrito após 30 minutos de cisalhamento a 2000 rpm.

A variação do torque em função do tempo de cisalhamento pode ser observada na Figura 2.11, para diesel puro e solução do aditivo A e desta cisalhada novamente, após uma semana deixada em repouso. Observa-se que a perda na capacidade de redução de atrito é mais acentuada no início do cisalhamento, e após um certo tempo a curva tende a se manter constante. Deixando-se a solução (já cisalhada) em repouso por uma semana e repetindo-se novamente o teste de cisalhamento (pontos vazados da Figura 2.11), observa-se que o torque, para manter a mesma rotação fixa de 2000 rpm da amostra uma semana após, é maior do que para a solução que foi imediatamente cisalhada por 30 minutos. Esses dados são um indicativo que o aditivo redutor de

atrito perde seu efeito sob ação mecânica intensa, devido à cisão das cadeias poliméricas (Nakken et al, 2001).

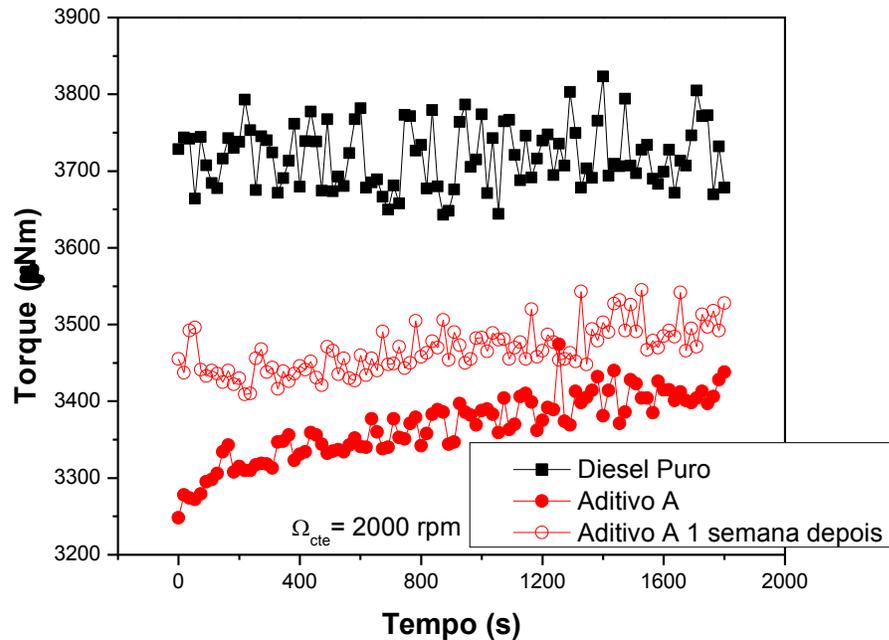


Figura 2.11: Torque em função do tempo de cisalhamento para diesel puro e soluções de aditivo A durante 30 minutos de cisalhamento constante a 2000 rpm, antes e após uma semana de repouso.

O mesmo estudo foi feito para uma solução de 7 ppm do Aditivo B. A partir da Figura 2.12 é possível verificar que a solução com o Aditivo B perde cerca de 37% em média de seu efeito redutor de atrito após 30 minutos de cisalhamento a 2000 rpm. Da mesma forma que o Aditivo A, o Aditivo B também sofre perda de seu efeito redutor de atrito sob cisalhamento e mesmo após uma semana de repouso, o aditivo redutor de atrito não regenera seu efeito (Figura 2.13).

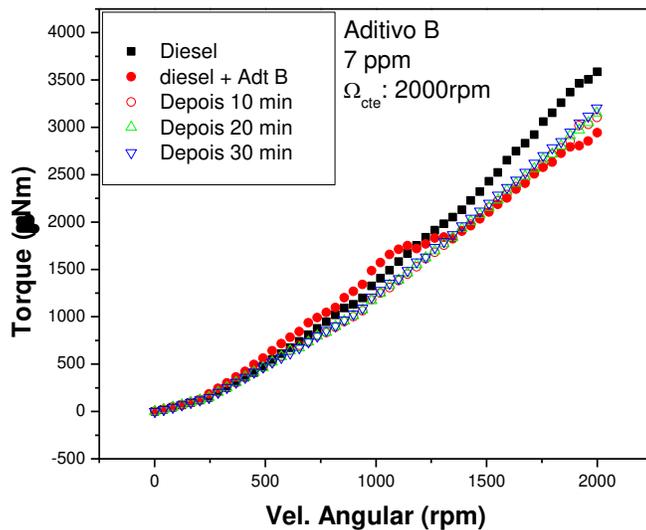


Figura 2.12: Curva de Fluxo: velocidade angular em função do torque para solução de 7 ppm do aditivo B. As curvas de pontos cheios são antes do cisalhamento constante a 2000 rpm. As curvas de pontos vazados são as curvas de fluxo obtidas após o tempo indicado em que a solução foi submetida ao cisalhamento constante.

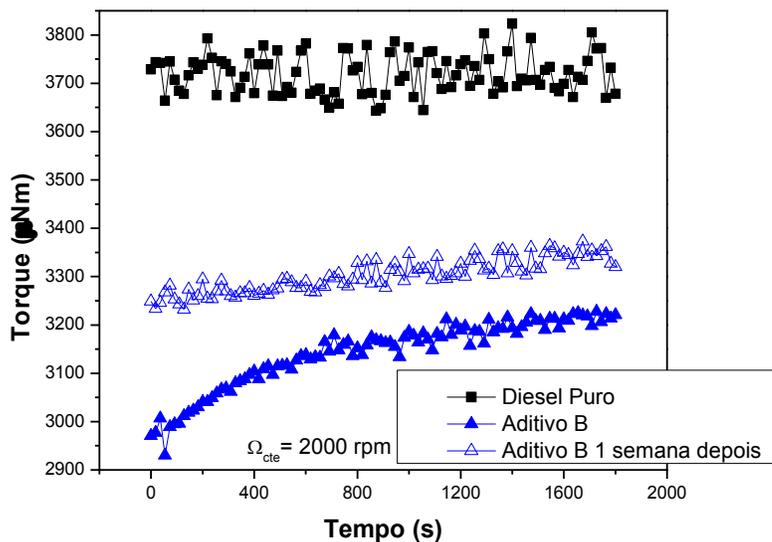


Figura 2.13: Torque em função do tempo de cisalhamento para diesel puro e soluções de aditivo B durante 30 minutos de cisalhamento constante a 2000 rpm, antes e após uma semana de repouso.

As curvas de degradação das soluções com os Aditivos A e B mostram-se muito parecidas entre elas; no entanto, a capacidade de reduzir o atrito é (como já demonstrado) mais pronunciado no Aditivo B (Figura 2.14).

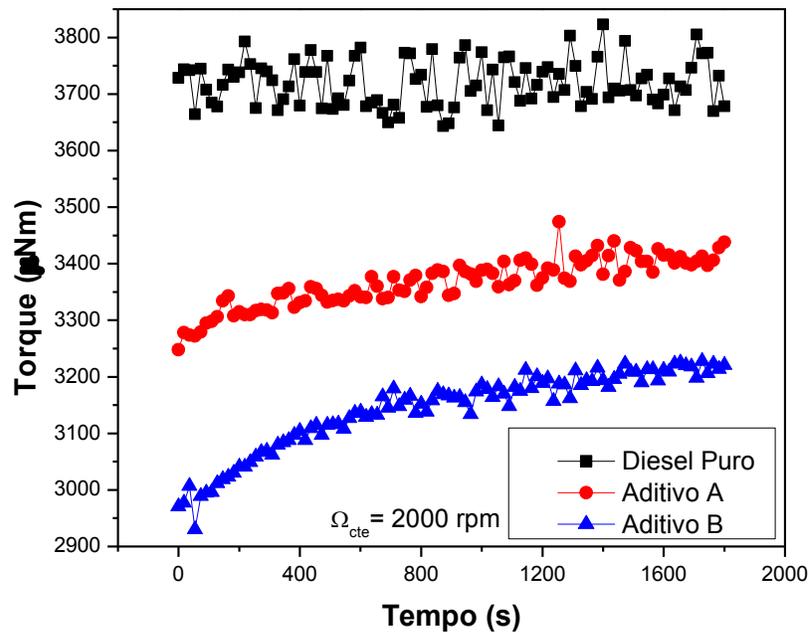


Figura 2.14: Torque em função do tempo de cisalhamento constante a 2000 rpm durante 30 minutos.

Para obter uma comparação quantitativa da degradação dos Aditivos A e B, foi aplicado um modelo cinético para a medida da degradação mecânica destes aditivos (Bizotto e Sabadini, 2008). A uma velocidade angular constante, pode-se assumir:

- As cadeias do polímero se quebram ao meio;
- Os fragmentos de polímero formados a partir de sua quebra não contribuem mais para o efeito da redução de atrito, portanto o modelo só é válido para o início da cinética de degradação, conforme mostrado na Figura 2.14;
- A taxa de degradação do polímero depende somente da concentração do polímero intacto em um tempo específico ($c_{p,t}$), assumindo uma cinética de primeira ordem:

$$\frac{dc_{p,t}}{dt} = -k_p c_{p,t} \xrightarrow{\text{integrando}} \ln\left(\frac{c_{p,t}}{c_M}\right) = -k_p t \quad (21)$$

sendo k_p a taxa de degradação do polímero que compõe o aditivo e c_M é a concentração de polímero quando se tem $t=0$. O efeito da redução de atrito permite considerar que a concentração de cadeias poliméricas intactas seja inversamente proporcional a tensão de cisalhamento ($\tau_{p,t}$) em um determinado tempo. Assim, a Equação (21) pode ser reescrita na forma:

$$\ln\left(\frac{\tau_M}{\tau_{p,t}}\right) = -k_p t \quad (22)$$

onde τ_M e $\tau_{p,t}$ são as tensões de cisalhamento na solução a $t=0$ e t , respectivamente. A partir dessas relações, tem-se (Figura 2.15).

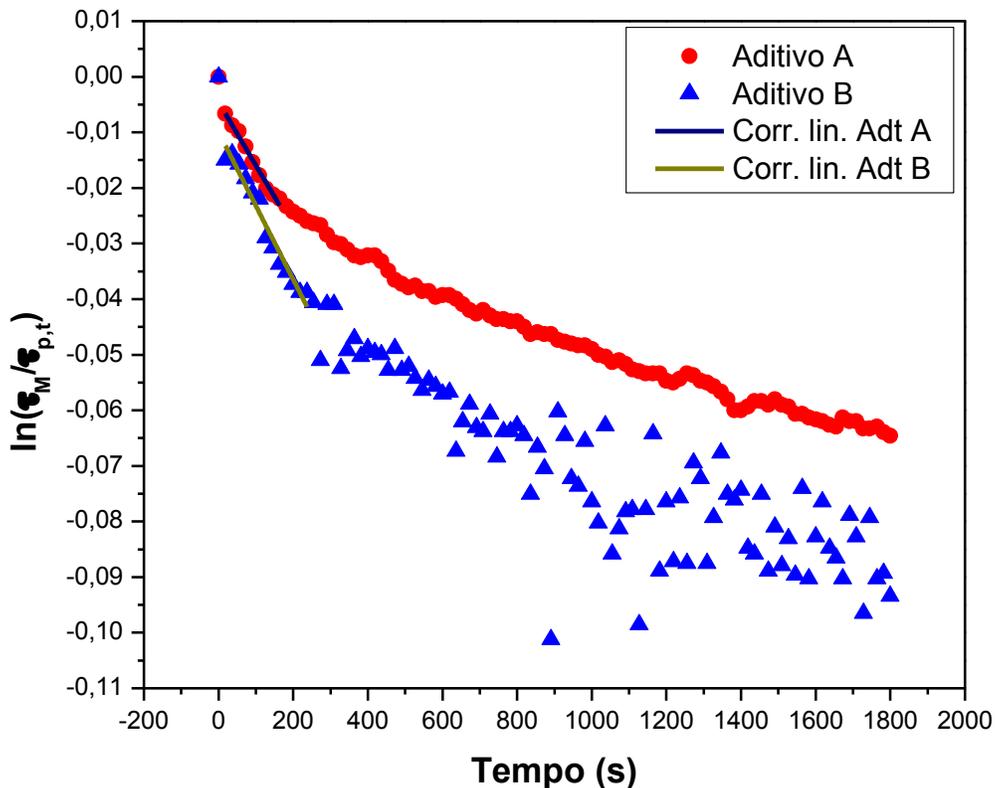


Figura 2.15: Dependência de $\ln(\tau_M/\tau_{p,t})$ em função do tempo para soluções de 7 ppm dos Aditivos A e B a uma velocidade angular constante de 2000 rpm. A correlação linear é mostrada para os primeiros 120 segundos no Aditivo A e 240 segundos no Aditivo B.

Os valores de taxa de degradação do polímero foram $k_A = (14 \pm 2) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $k_B = (13,6 \pm 0,8) \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Com este método, pode-se observar que a taxa de degradação dos aditivos está dentro do erro experimental para a mesma.

Sobre o modelo cinético adotado para a análise da taxa de degradação, é possível que nem todas as cadeias do polímero se quebrem ao meio e que as partes formadas a partir desta quebra podem ainda possuir condições de conferir efeito de redução de atrito, mesmo que em menor escala. O modelo adotado é simplificado para possibilitar a análise da degradação dos aditivos redutores de atrito. Por ser um modelo simplificado, não explica totalmente o comportamento da solução ao longo do tempo sob cisalhamento constante.

3. CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O circuito de escoamento para estudo de redução de atrito em óleo diesel foi montado no Laboratório Kelsen Valente Serra (LabPetro) na UNICAMP para experimentos em condições próximas às reais de transporte de fluidos em tubulações. O planejamento do circuito foi baseado em experimentos anteriores de injeção de aditivos no escoamento de fluidos, executados no LabPetro (França *et al.* 2008), que reproduzem condições experimentais próximas às condições reais de transporte de fluidos em tubulações. Uma figura esquemática (sem escala) do circuito construído está representado na Figura 3.1:

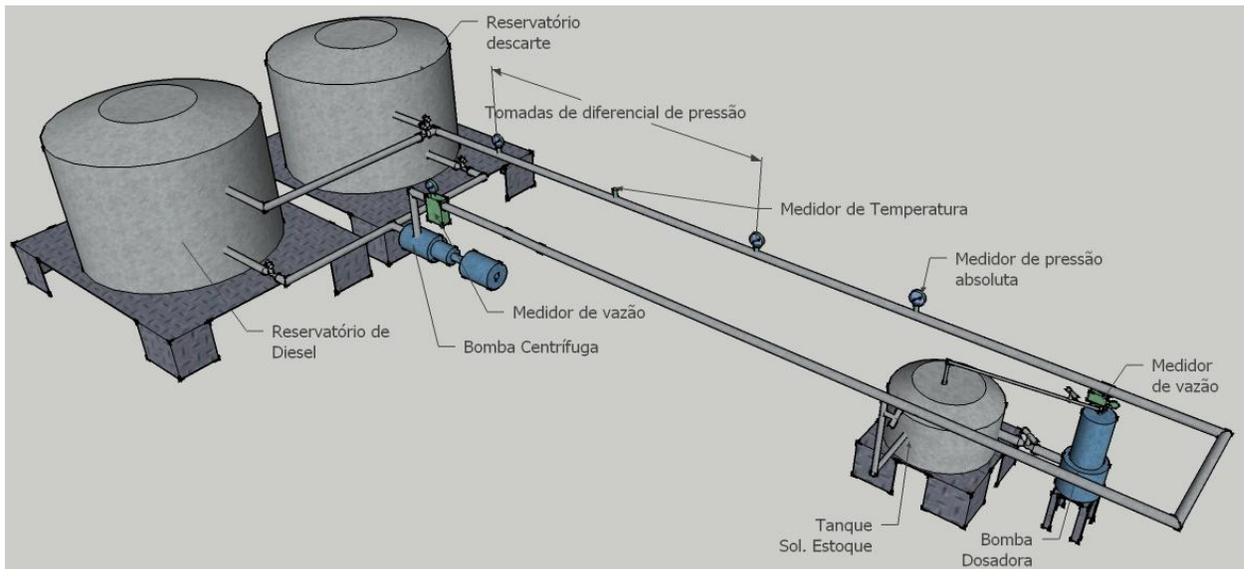


Figura 3.1: Desenho esquemático do circuito de tubulação para o estudo de redução de atrito hidrodinâmico.

O dimensionamento da linha de escoamento foi feito com o auxílio de uma planilha de cálculo (Excel 2007) na qual variáveis como vazão de óleo diesel, vazão de injeção de solução de aditivo, volume gasto de óleo diesel, volume gasto de solução de aditivo, concentração de solução de aditivo e perda de carga total na linha foram determinados a partir da inserção de valores de

diâmetro de tubulação, número de Reynolds, densidade do óleo diesel, concentração de aditivo na tubulação, volume de óleo diesel no tanque dosador, volume de aditivo, tempo de experimento, comprimento total da linha, rugosidade da tubulação, desnível de entrada e saída do óleo diesel e número de cada elemento de perda de carga do sistema. Uma visão da planilha de cálculo utilizada encontra-se na Figura 3.2.

A planilha foi construída a partir das equações para número de Reynolds, vazão e conversão de unidades. A seção “Projeto LabPetro” mostra as informações sobre a linha principal de escoamento de diesel, já a seção “Bomba p/ polímero” reúne os dados da injeção da solução estoque de aditivo (o valor em rpm é a rotação da bomba injetora). A seção “Dimensionamento” define os volumes gastos de óleo diesel e de solução de aditivo de acordo com o tempo de experimento estipulado, auxiliando na decisão do volume necessário para os tanques. A seção “Perda de carga” calcula a perda de carga da linha como um todo, e este dado foi utilizado para definir a especificação necessária da tubulação. Considerando-se as limitações de segurança e o espaço disponível para a montagem do circuito, os principais parâmetros do circuito estão descritos na Tabela 3.1:

Tabela 3.1: Parâmetros principais do circuito montado no LabPetro.

Diâmetro interno da linha	2”
Material	Aço Galvanizado
Comprimento total	75 m
Volume dos tanques de armazenamento e descarte	2000 L
Volume do tanque de injeção de solução de aditivo	100 L
Vazão de óleo diesel	Até 264 kg/min
Número de Reynolds	Até 43000

Projeto LabPetro

$v = 2,40$ m/s	$Q = 19,4$ m ³ /h
$D = 2,11$ pol = 0,0535 m	$\rho = 817$ kg/m ³
$v = 3$ mm ² /s = 0,0000030 m ² /s	$Q_{massico} = 264$ kg/min
$Re = 42723$	

Bomba p/ Polimero

[pol] linha = 10 ppm	$Q_{mas} = 4,400$ kg/s
$Q_{bcp} = 0,518$ kg/s	
$Q_{polimero} = 2,281$ m ³ /h = 1864 kg/h	31 kg/min 875 rpm

Dimensionamento

tempo exp. = 0,333 min = 20 s (10x20s)	
Tanque diesel = 0,1077 m ³ = 108 L	$V_{linha} = 168,4206$ L
Tanque pol. = 0,013 m ³ = 13 L	(57.5L para varrer [pol] de 10 a 100 ppm)

Perda de Carga

$L = 74,92$ m		
$e = 0,15$ mm = 0,00015 m		(aço galvanizado)
$f = 0,0286$		
Colebrook: 1º termo = 5,913		
2º termo = 5,913		
resolução: -0,0001		
$\Delta p_{atrito} = 0,93$ atm		
$K_{saida\ tanque} = 0,5$	1 saída	$\Delta p = 0,011569$ atm
$K_{entrada\ tanque} = 1$	1 entrada	$\Delta p = 0,023139$ atm
Le/D cotovelos = 30	11 cotovelos	$\Delta p = 0,2184$ atm
Le/D val. Esfera = 3	4 válvulas	$\Delta p = 0,007941$ atm
Le/D curva retorno = 50	1 curva de retorno	$\Delta p = 0,0331$ atm
Le/D Tê = 20	2 Tê's	$\Delta p = 0,026471$ atm
Le med vazão = 30 m	1 medidor de vazão	$\Delta p = 0,3711$ atm
		$\Delta p_{elementos} = 0,691687$ atm
altura sistema = 2 m		
$\Delta p_{altura} = 0,179$ atm		
$\Delta p_{total} = 1,80$ atm		

Figura 3.2: Planilha de dados utilizada no projeto do circuito de testes de redução de atrito em linha no LabPetro. Os cálculos de concentração de solução estoque estão em uma segunda planilha.

3.1. Equipamentos utilizados na construção do circuito

3.1.1. Tubulação e válvulas da linha principal

Foram utilizados aproximadamente 75 m de tubulação em aço galvanizado, com 2” de diâmetro interno e uma espessura de 3,00 mm. As válvulas utilizadas são do tipo esfera bipartida com passagem plena. A pressão máxima suportada pelo sistema de tubulações, válvulas e conexões é de 20 kgf/cm².

3.1.2. Reservatórios de diesel e descarte

Ambos os tanques possuem 2 m³ de volume, elevados a uma altura de 1,75 m a partir do nível da bacia de contenção (construída em alvenaria). Possuem também indicador de nível, suspiro e dreno, além de possuírem sistema de aterramento. Uma foto dos tanques pode ser vista na Figura 3.3. Por questões de segurança, os reservatórios foram mantidos no exterior do prédio do Labpetro.



Figura 3.3: Reservatórios de óleo diesel (esquerda) e descarte (direita) que se localizam na parte externa ao LabPetro.

3.1.3. Tanque para solução estoque de aditivo em diesel

O tanque metálico utilizado para o preparo e injeção da solução estoque de aditivo redutor de atrito possui 0,1 m³ de volume com caixa de contenção acoplada. Possui também pintura epóxi, respiro, dreno, indicador de nível (com “volume morto” de 16 litros) e sistema *by-pass*. Uma foto do tanque pode ser vista na Figura 3.4.



Figura 3.4: Tanque para solução estoque de aditivo redutor de atrito em diesel e bomba helicoidal para injeção da solução estoque de aditivo na linha de diesel. No canto superior esquerdo pode-se observar o medidor de vazão mássica da solução estoque.

3.1.4. Bomba centrífuga

A bomba utilizada para o escoamento do diesel pela tubulação de 2 polegadas foi uma bomba centrífuga KSB Megachem com 40 mm de diâmetro na flange de recalque e 200 mm de diâmetro nominal do rotor. Possui um motor Weg de 15 kW (20 CV), com frequência máxima de 60 Hz e rotação máxima de 3500 rpm, controlados por um inversor de frequência. Uma foto desta bomba pode ser vista na Figura 3.5.



Figura 3.5: Bomba centrífuga utilizada no escoamento do óleo diesel. Acima, reservatório de óleo diesel.

3.1.5. Bomba para injeção de solução estoque de aditivo

O cisalhamento da solução estoque de aditivo deve ser evitado, pois esta ação pode degradar o componente ativo da formulação do mesmo, influenciando a redução de atrito. Além disso, de acordo com o projeto inicial, seria necessária a injeção de pequenos volumes a pressões relativamente altas. Assim, foi utilizada uma bomba dosadora helicoidal Imbil 2 BHI 50, com rotor de 50 mm de diâmetro. Possui um motor Weg de 3,0 kW (4,0 CV), com frequência máxima de

60 Hz e rotação variando de 90 a 1725 rpm, controlados por um inversor de frequência. O sistema possui uma caixa de redução, para que seja possível atingir baixas rotações na bomba (evitando o cisalhamento). Uma foto desta bomba pode ser vista na Figura 3.4.

3.1.6. Medidor mássico de vazão na linha de óleo diesel principal

Para a medida de vazão da linha de diesel foi utilizado um medidor de vazão mássica tipo Coriolis Metroval RHM40, na faixa de 90 a 900 kg/min, possuindo um diâmetro de flange de 3". Uma foto deste medidor de vazão pode ser vista na Figura 3.6.



Figura 3.6: Medidor mássico de vazão tipo coriolis utilizado na linha de diesel.

3.1.7. Medidor mássico de vazão para solução estoque de aditivo

Para a medida de vazão de solução estoque de aditivos foi utilizado um medidor de vazão mássica tipo Coriollis Emerson modelo R100S128, na faixa de 1632 a 16325 kg/h (27,20 a 272,08 kg/min), possuindo um diâmetro de flange e linha de injeção de 1". Uma foto deste medidor de vazão pode ser vista na Figura 3.4.

3.1.8. Transmissor de pressão

A medida do diferencial de pressão foi feita com um transmissor de pressão diferencial Smar LD301, a uma faixa de 0,0 a 100,0 mbar, acoplado a uma válvula manifold Smar 5 vias tipo Y, sendo 1 de equalização, 2 de bloqueio e 2 de dreno. Uma foto do transmissor de pressão e da válvula manifold pode ser vista na Figura 3.7.

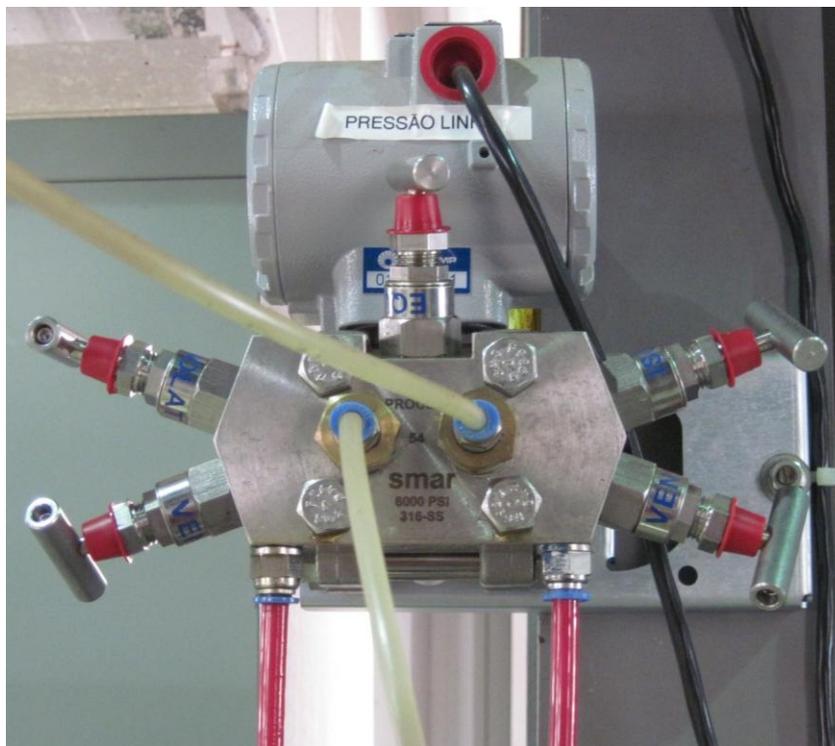


Figura 3.7: Transmissor de pressão (mbar) de dois pontos da linha de diesel, distantes por 4 m. A frente, válvula manifold de 5 vias. O canal da esquerda é conectado ao primeiro ponto de tomada de pressão e o canal da direita, é conectado ao segundo ponto de pressão.

3.1.9. Termorresistência

A temperatura do óleo diesel durante o escoamento foi medida com uma Termorresistência tipo RTD, modelo Pt100, ligado a um transmissor de temperatura. A termorresistência foi colocada entre os dois pontos de medida do diferencial de pressão (ver Figura 3.1).

3.1.10. Sistema de aquisição de dados

Para aquisição e processamento dos dados de vazão mássica da linha de óleo diesel, vazão mássica da solução estoque de aditivo, diferencial de pressão e temperatura do diesel em circulação, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da National Instruments (Signal Express versão 2010). Os dados adquiridos por esse sistema foram processados a partir das curvas de calibração fornecidas pelos fabricantes dos medidores de vazão e do transmissor de pressão. A calibração da termorresistência foi feita no LabPetro, utilizando um forno de calibração Ecil. Os dados de calibração das medidas de vazão da linha, vazão da solução estoque, diferencial de pressão e temperatura encontram-se no Anexo I.

3.2. Funcionamento do circuito

O óleo diesel sai do reservatório e, após passar pela bomba centrífuga, entra na linha e passa pelo medidor de vazão tipo Coriollis. O diesel permanece circulando pela linha principal do circuito onde é medido o diferencial de pressão, que será utilizado para comparação com os dados obtidos após a aditivação do óleo diesel.

A solução de diesel aditivado é injetada na linha principal pela bomba dosadora tipo parafuso – o agente redutor de atrito não pode ser cisalhado, pois o cisalhamento da bomba pode degradar o composto, influenciando a redução de atrito. Os cálculos para estimar a vazão da solução estoque na linha foram feitos com a planilha de cálculo, avaliando a concentração da solução estoque, a concentração desejada no escoamento e a vazão de diesel no circuito. Um segundo medidor de vazão do tipo Coriollis (Micro Motion R1) foi utilizado para medir a vazão da solução estoque de agente redutor de atrito injetado na linha e determinar a relação entre rotação da bomba dosadora e sua vazão.

Após a aditivação, o diesel escoava entre os pontos de medidas de diferencial de pressão, distantes 4 metros um do outro. Os dados de diferencial de pressão, vazão da linha principal, vazão da solução estoque e temperatura são adquiridos em microcomputador para posterior processamento. Um sistema de aquisição de dados da National Instruments foi programado para adquirir e pré-processar esses dados.

Após as medidas de diferencial de pressão, o diesel aditivado vai para um segundo tanque (descarte), para não contaminar o tanque com diesel puro. Além disso, pode-se efetuar ensaios de degradação mecânica a fim de verificar a resistência do aditivo nas condições de operação estudadas. Neste caso, o ensaio é muito semelhante ao ensaio da redução de atrito, porém a linha é alimentada com o diesel aditivado, retornando ao mesmo reservatório.

A preparação da solução estoque de diesel contendo o aditivo redutor de atrito foi feita diretamente no tanque injetor, por volumetria. A homogeneização da solução deu-se por circulação da solução através de um *by-pass*.

3.3. Ajustes pós-construção do circuito

3.3.1. Limitação na pressão da linha de escoamento

Durante os primeiros testes de escoamento do diesel na tubulação foi observada a presença de vazamentos em algumas conexões, que foram controlados utilizando cola do tipo “araudite”. Mesmo assim, em alguns locais o vazamento persistiu, observando-se sua diminuição ao longo do experimento. Porém, sob pressões mais altas (a partir de 2 kgf/cm²) a quantidade de vazamentos aumentava bastante, limitando as condições de operação do circuito.

3.3.2. Estabilidade da linha em relação ao escoamento de óleo diesel

A Figura 3.8 apresenta o seguinte comportamento para o escoamento de óleo diesel, sem adição de aditivos, no circuito construído:

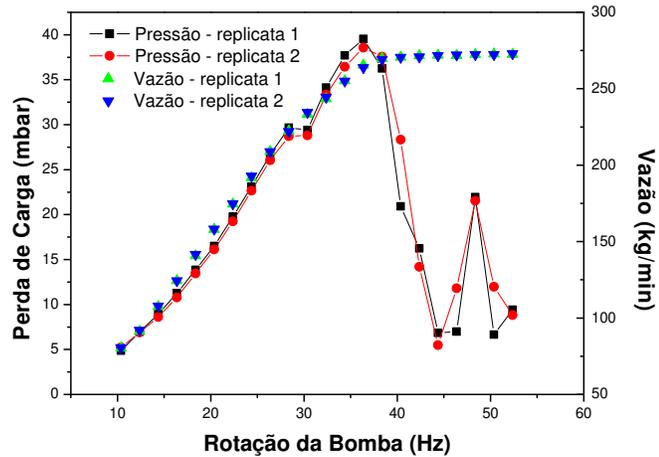


Figura 3.8: Perda de carga e vazão em função da rotação da bomba centrífuga no escoamento de óleo diesel.

À medida que se aumentou a rotação da bomba, a vazão e a perda de carga também aumentaram, até a rotação de 36 Hz, como esperado. Após esse valor, a vazão manteve-se estável em 272 kg/min e a perda de carga apresentou resultados não previstos. Além disso, a partir desse ponto, a linha apresentava muita vibração e barulho.

A partir da curva de resposta da bomba disponibilizada pelo fabricante (Anexo II), o NPSH requerido é de 2,5 m e para o NPSH disponível do sistema foi encontrado um valor de 9,69 m, de acordo com a Equação (23):

$$\text{NPSH}_{\text{disponível}} = \frac{p_{\text{tanque}} - p_{\text{vapordiesel}}}{\rho \cdot g} + (z_{\text{tanque}} - z_{\text{sucção}}) - h_{\text{lt}} > \text{NPSH}_{\text{requerido}} \quad (23)$$

onde p_{tanque} é a pressão dentro do tanque (pressão atmosférica), $p_{\text{vapordiesel}}$ é a pressão de vapor do óleo diesel na temperatura do escoamento (19,5 kPa @ 38,7°C) (Menezes et al, 2006), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), $z_{\text{tanque}} - z_{\text{sucção}}$ é a diferença de altura entre o eixo da bomba e o ponto de sucção do diesel e h_{lt} é o somatório das perdas de carga na tubulação de sucção. Como os dados da tubulação satisfazem a desigualdade expressa na Equação (23), podemos concluir que a vibração e instabilidade na linha não são provenientes do efeito de cavitação na bomba. Portanto, a seleção da bomba de diesel estava de acordo com o procedimento recomendado (Gonçalves, 2010).

Durante a operação de carregamento do tanque injetor de solução de diesel com aditivo, observou-se que o diesel forma bastante espuma ao entrar no tanque (Figura 3.9), pois nesta operação há uma certa agitação do sistema. No estudo do comportamento da linha, o diesel retorna para mesmo tanque do qual foi retirado. Desta forma, uma hipótese para esta instabilidade da linha nesta região de escoamento, pode estar relacionada à sucção de parte desta espuma, que provavelmente está sendo formada no retorno do diesel ao tanque.



Figura 3.9: Óleo diesel coletado pelo dreno no recalque da bomba injetora de solução estoque de aditivo. A espuma é coletada juntamente com o diesel.

No entanto, as replicatas observadas na Figura 3.8 são bastante concordantes, o que faz com que a hipótese de haver espuma na tubulação talvez não seja a única razão do comportamento observado. O comportamento do óleo diesel dentro do tanque reservatório foi observado durante uma operação de transferência de óleo de um tanque para outro, e em função da grande quantidade de espuma, não foi observado a formação de vórtices dentro do tanque – que poderia também fazer que ar entre na bomba, causando o comportamento anômalo a altas rotações da bomba centrífuga.

Para avaliar o efeito de possíveis espumas na tubulação de diesel foi comparado o fator de atrito f obtido na tubulação (a partir da Equação (9)) com o fator de atrito calculado a partir da equação de Colebrook (Equação (23), onde ϵ é a rugosidade da tubulação (0,15 mm para aço galvanizado), originando o gráfico da Figura 3.10:

$$\frac{1}{f} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon_{\text{rug}}/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (24)$$

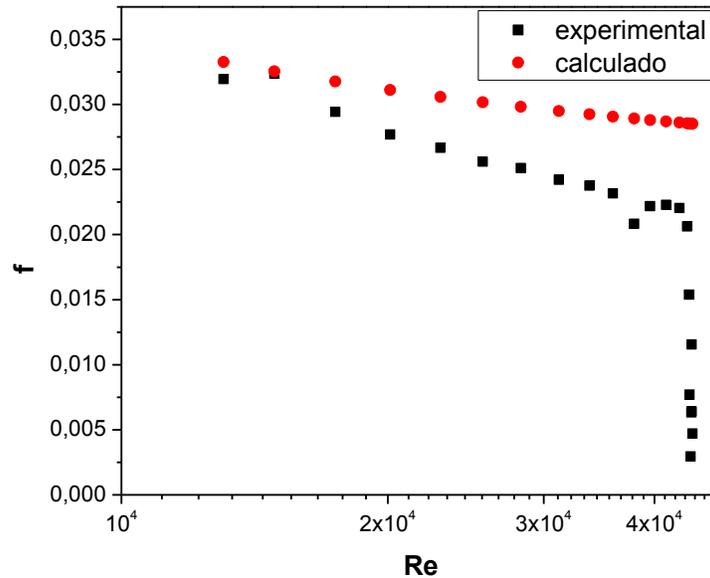


Figura 3.10: Fator de atrito em função do número de Reynolds para o intervalo de vazões de 80 a 273 kg/min na linha de escoamento de diesel.

Observa-se pelo gráfico da Figura 3.10 que a curva experimental mostra-se bem diferente da curva teórica. Na região de número de Reynolds maior que 4×10^4 , o fator de atrito apresenta uma queda bem acentuada. Essa região coincide com a região de vazão constante da Figura 3.8 e que apresenta uma alta vibração na linha de diesel. À medida que o número de Reynolds diminui (isto é, quando a vazão da linha diminui), a curva experimental vai se aproximando da curva calculada, o que reforça a hipótese da formação de espuma durante o escoamento do óleo diesel.

3.3.3. Injeção da solução estoque de aditivo na linha de diesel

A injeção dos aditivos foi feita por uma bomba helicoidal de deslocamento positivo. Inicialmente utilizaríamos um medidor de vazão tipo coriolis para a determinação da vazão da solução injetada. Porém em altas vazões de injeção, foi percebida a formação de espuma no diesel que altera significativamente os valores de perda de carga na tubulação (Figura 3.9). Assim, para a

injeção da solução de aditivo, a vazão foi controlada pela rotação da bomba injetora, de acordo com a relação na Equação (25 que foi originada a partir do gráfico da Figura 3.11:

$$\text{Vazão(kg/h)} = 2,146(\text{Rotação(rpm)}) - 14 \quad (25)$$

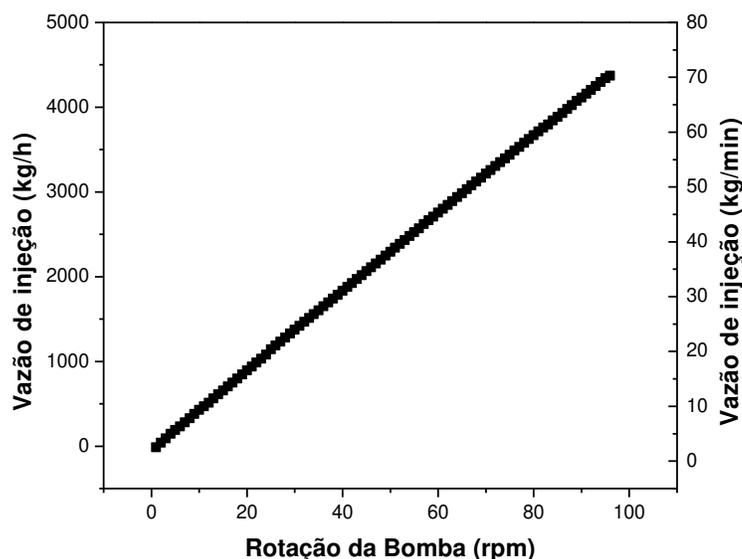


Figura 3.11: Vazão de injeção da solução de aditivos (em kg/h e kg/min) em função da rotação da bomba injetora. O gráfico foi obtido com a linha principal operando a vazão de 264 kg/min.

Para mensurar o efeito da injeção de certo volume de fluido na linha de diesel, foi avaliado o efeito da injeção de várias vazões de diesel puro na linha principal de escoamento. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 3.2. Devido à formação de espuma no processo de injeção do diesel, e seu efeito na medida de perda de carga, o limite máximo de vazão de injeção que se pode trabalhar neste sistema é 400 kg/h (6,67 kg/min).

Tabela 3.2: Valores de perda de carga na linha de escoamento de óleo diesel de acordo com a vazão de injeção da bomba dosadora.

Vazão de Injeção (kg/h)	Δp linha (mbar)	
	Replicata 1	Replicata 2
0	37	39
179	37	39,2
362	37,8	39

Vazão de Injeção (kg/h)	Δp linha (mbar)	
	Replicata 1	Replicata 2
549	35	35,0
740	31	29,0
937	21	25
1137	21	19,7
1343	2,3	7
1554	16	16
1770	4	10
1992	0,75	0,78

3.4. Procedimento experimental de medida de redução de atrito em linha

Os experimentos de redução de atrito hidrodinâmico na linha de escoamento de óleo diesel foram realizados com os Aditivos A e B, nas concentrações de 10 a 50 ppm, em duplicata. Cada teste de injeção de redutor de atrito segue a seguinte seqüência:

- a. Abertura da válvula de entrada para o tanque de descarte e fechamento da válvula de entrada para reservatório de diesel;
- b. Abertura da válvula de injeção do aditivo e fechamento da válvula do *by-pass* do tanque da solução estoque de aditivo.
- c. Contagem de 40 segundos para a aquisição dos dados de perda de carga com o aditivo (com o auxílio de um cronômetro);
- d. Abertura da válvula do *by-pass* e fechamento da válvula de injeção;
- e. Abertura da válvula de entrada para o reservatório de diesel e fechamento da válvula de entrada para o tanque de descarte.

Para a execução dos testes são necessárias três pessoas: a primeira para as funções “a” e “e”, a segunda para as funções “b” e “d” e a terceira para a função “c”. Antes de dar início à seqüência, deve-se ajustar a rotação da bomba da linha principal e da injeção de aditivo para a

vazão desejada, manter o sistema de injeção de aditivo operando em *by-pass*, manter a saída do descarte fechada e iniciar a aquisição dos dados de vazão, temperatura e perda de carga (para obter os valores de perda de carga sem a injeção de aditivo).

A Figura 3.12 mostra o gráfico obtido a partir de um teste de injeção de aditivo na linha principal de óleo diesel. A redução de atrito é calculada a partir da média de pontos na linha do diesel puro e da média de pontos da linha do diesel com aditivo utilizando a Equação (8). Os pontos intermediários a essas duas situações são referentes às perturbações que as operações de trocas de válvulas ocasionam no escoamento e à zona de mistura formada no início e no final da injeção do aditivo.

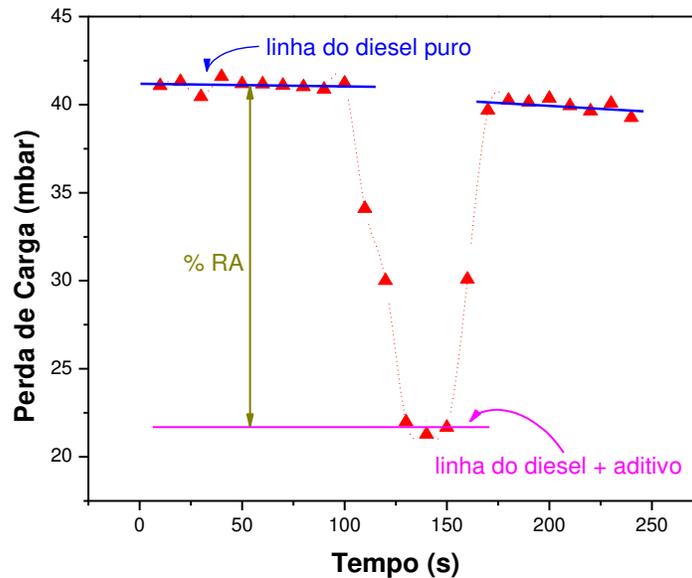


Figura 3.12: Representação do cálculo da porcentagem de redução de atrito a partir de um gráfico de Perda de Carga em função do Tempo. Este teste representa a injeção de 10 ppm do Aditivo B em uma vazão de 261 kg/min de diesel a 31°C.

Após o teste de injeção de aditivo, deve-se retornar todo o diesel aditivado ao reservatório de diesel e manter todo o diesel em circulação na linha, a fim de promover a degradação mecânica do aditivo e reutilizar o diesel para o teste seguinte. O diesel permanece em circulação, até que a perda de carga retorne aos valores do diesel puro, o que consome entre uma e duas horas de circulação.

A temperatura da linha influencia no valor da perda de carga, e sucessivas passagens pela bomba centrífuga fazem com que a temperatura do óleo diesel aumente. Assim, para auxiliar na determinação da perda de carga que deve ter o diesel após a completa degradação do aditivo, dados experimentais de perda de carga e temperatura foram coletados antes das injeções de aditivo, resultando no gráfico da Figura 3.13.

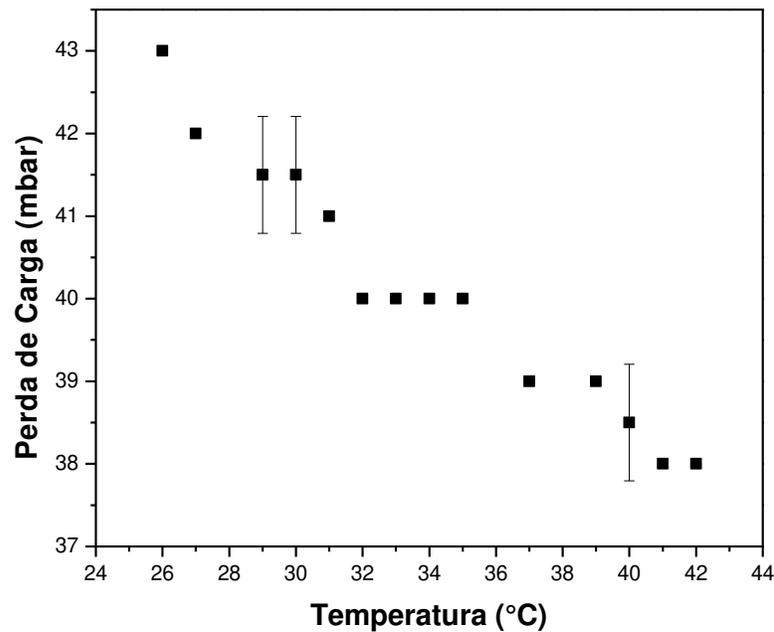


Figura 3.13: Perda de carga em função da temperatura para o escoamento de óleo diesel sem aditivos na linha principal a uma vazão de aproximadamente 260 kg/min.

Esta operação de degradação mecânica do aditivo é necessária após cada injeção, pois devido a problemas de espuma e perda de pressão hidrostática do reservatório de diesel, a relação entre perda de carga em função do tempo (Figura 3.12) fica comprometida, conforme mostrado na Figura 3.14.

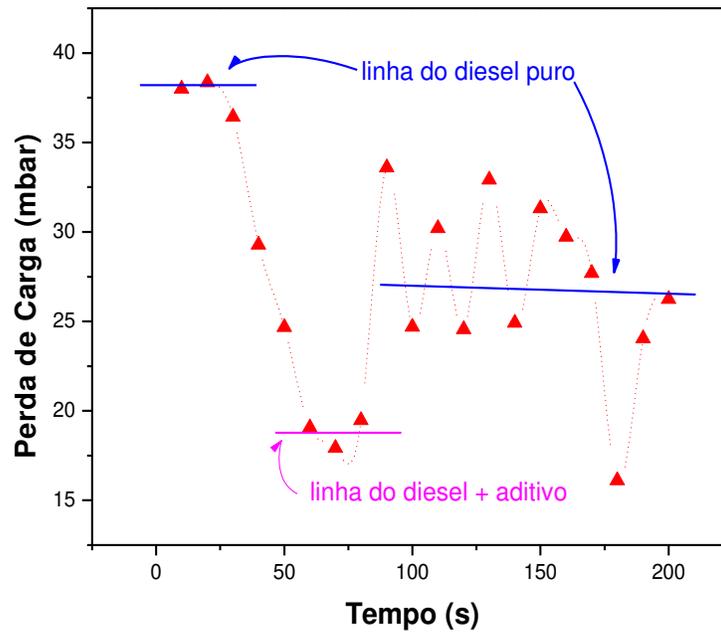


Figura 3.14: Gráfico do teste de injeção comprometido pelo nível baixo de óleo diesel no tanque de armazenamento. Esses dados são referentes à injeção de 20 ppm do Aditivo B em uma vazão de 256 kg/min e 35°C.

4. EXPERIMENTOS DE REDUÇÃO DE ATRITO HIDRODINÂMICO EM LINHA DE ESCOAMENTO

4.1. Resultado do primeiro teste

Foram preparados 65 L de uma solução estoque de 95 ppm de Aditivo B em óleo diesel a ser injetada na linha de escoamento. A vazão da linha principal foi de 260,38 kg/min, exigindo uma vazão de injeção de polímero de 30,48 kg/min, obtendo assim uma concentração de 9,5 ppm do Aditivo B na tubulação. Cerca de 4000 pontos foram adquiridos numa taxa de 400 Hz, resultando num tempo de aquisição de dados de 10 s. A Tabela 4.1 mostra a aquisição dos dados do experimento:

Tabela 4.1: Dados do primeiro experimento de redução de atrito na linha de óleo diesel.

Vazão Injeção (kg/min)	Perda de carga (mbar)	Vazão Linha (kg/min)	Número de Reynolds	RA (%)	Operação
---	37,96	263,15	42586	---	diesel puro
29.6	12,81	252,28	40827	---	troca de válvulas
30.4	1,38	260,35	42133	96	injeção de ARA
30.5	2,64	260,41	42142	93	injeção de ARA
20.5	17,35	260,74	42196	---	troca de válvulas

A vazão da linha foi medida antes da injeção da solução de aditivo e a medida de porcentagem de redução de atrito é dada pela Equação (8), o que retorna, 95% de redução de atrito para 9,5 ppm do Aditivo B (média dos dois valores de perda de carga obtidos em 4 m de tubulação). Dos experimentos pesquisados na literatura, de acordo com Cuenca et al, a injeção de 20 ppm de uma poliolefina a números de Reynolds de 110.000 a 232.000 promovem 45,3% de redução de atrito. Porém de acordo com a ficha de dados do Aditivo B fornecido pelo fabricante, é possível atingir mais que 85% de redução de atrito em uma tubulação (Comunicação Pessoal com o fabricante). No entanto, o resultado obtido com este primeiro experimento foi considerado

atípico, e resultou no estudo do efeito da vazão de injeção na medida de perda de carga na linha principal (Item 3.3.3).

A avaliação do efeito da vazão de injeção na medida de perda de carga (item 3.3.3) mostrou que no caso deste primeiro experimento, a vazão de injeção não estava adequada, uma vez que para este sistema o recomendado seria utilizar uma vazão de até 400 kg/h. Desta forma, o resultado obtido neste primeiro teste não foi considerado.

4.2. Degradação Mecânica do Aditivo em Linha

Durante a realização do primeiro ensaio de redução de atrito no circuito, ocorreu a contaminação do diesel presente no reservatório por solução de Aditivo B (com a diluição no diesel puro do tanque, a concentração do aditivo em diesel foi estimada em valor muito menor que 10 ppm). Esta situação foi aproveitada para estudos de degradação do Aditivo B em linha. Um dos objetivos desta investigação é verificar se é possível reutilizar o óleo diesel com aditivo para os próximos testes. O diesel foi recirculado na linha continuamente, saindo e retornando ao mesmo tanque (Reservatório de Descarte), sendo a perda de carga e a vazão monitoradas em função do tempo de escoamento (Figura 4.1).

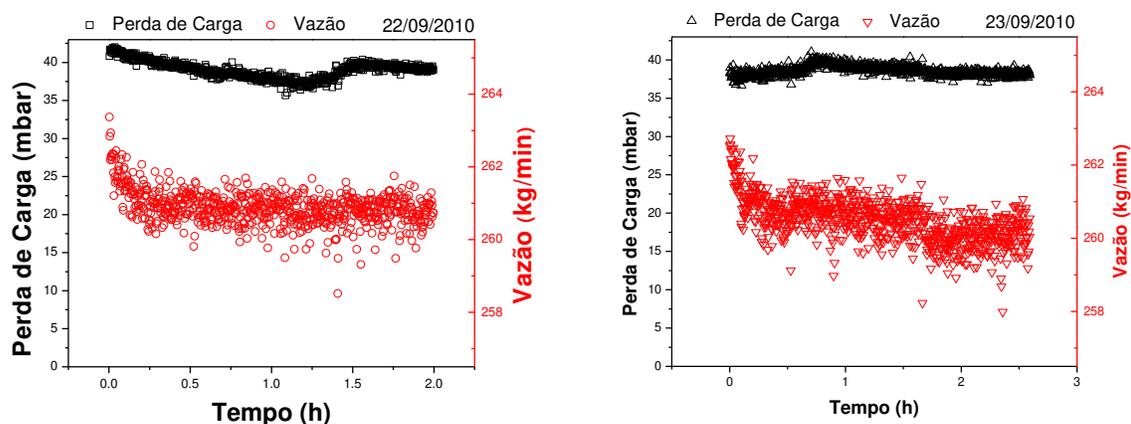


Figura 4.1: Perda de carga (em preto) e vazão do diesel (em vermelho) em função do tempo de escoamento na tubulação de óleo diesel. Os dados representados no gráfico à direita foram obtidos no dia seguinte aos dados representados no gráfico à esquerda. Os dois experimentos totalizaram 4 horas e 35 minutos de escoamento.

Observa-se que durante o tempo de escoamento ininterrupto, a vazão manteve-se constante em 260,5 kg/min com uma variação de 0,6 kg/min (0,23%). Por outro lado, o diferencial de pressão observado tem uma queda acentuada durante a primeira hora do experimento do primeiro dia (Figura 4.1, esquerda), depois mostra um aumento no diferencial de pressão. Este resultado pode ser correlacionado com o efeito hidrodinâmico causado pela pequena quantidade de aditivo presente no diesel. No dia seguinte, o mesmo experimento (Figura 4.1, à direita) mostra valores mais constantes de perda de carga: 39 mbar com uma variação de 1 mbar (2,5%). A variação do diferencial de pressão também sofre influência da temperatura na linha (Figura 4.2). O atrito e as perdas dissipativas que ocorrem ao longo da linha, no interior da bomba, nas válvulas e conexões causam um aumento progressivo de temperatura no sistema que diminui a densidade e sobretudo a viscosidade do óleo diesel. Em circuito fechado, pode-se afirmar que toda a potência da bomba será dissipada no fluido. De acordo com a Equação (9) uma diminuição da densidade e da viscosidade implica em uma perda de carga proporcionalmente menor. Isto pode explicar a variação nos valores de Δp na tubulação, onde foi observado um aumento de aproximadamente 5°C em uma hora de escoamento a 264 kg/min (Figura 4.2).

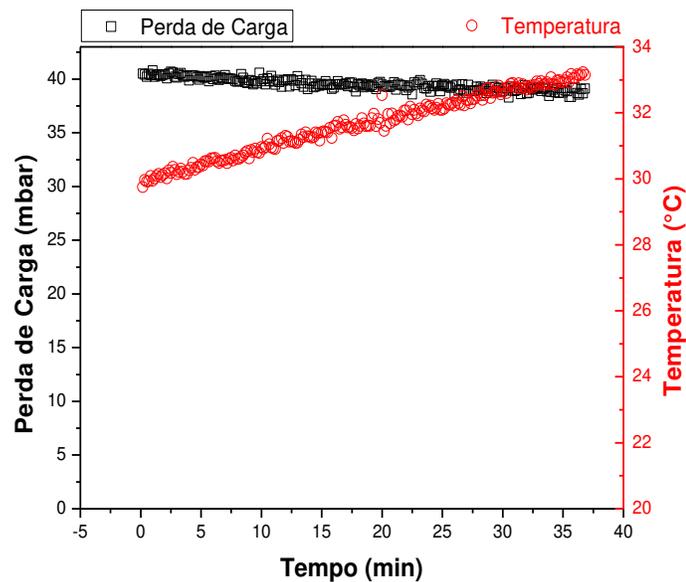


Figura 4.2: Perda de carga e temperatura da linha em função do tempo de escoamento do óleo diesel, na vazão de 264 kg/min.

Assumindo que o volume de diesel contaminado foi de 1500 litros, a partir da vazão e do tempo de escoamento, estima-se que uma mesma quantidade de massa tenha percorrido cerca de 60 vezes o comprimento total da tubulação. Para verificar se o diesel que foi contaminado realmente retornou as suas propriedades originais após esse período de escoamento, foi realizado um teste em reômetro comparando este diesel com um óleo limpo (Figura 4.3). Observa-se que a curva para o diesel contaminado é sobreposta com a curva do diesel puro, mostrando que o mesmo diesel pode ser utilizado em vários testes, pois o cisalhamento imposto pelo escoamento e pela bomba do circuito é suficiente para que o Aditivo B perca seu efeito de redução de atrito (e muito provavelmente o Aditivo A se comporte da mesma forma, assim como foi verificado nos testes em reômetro).

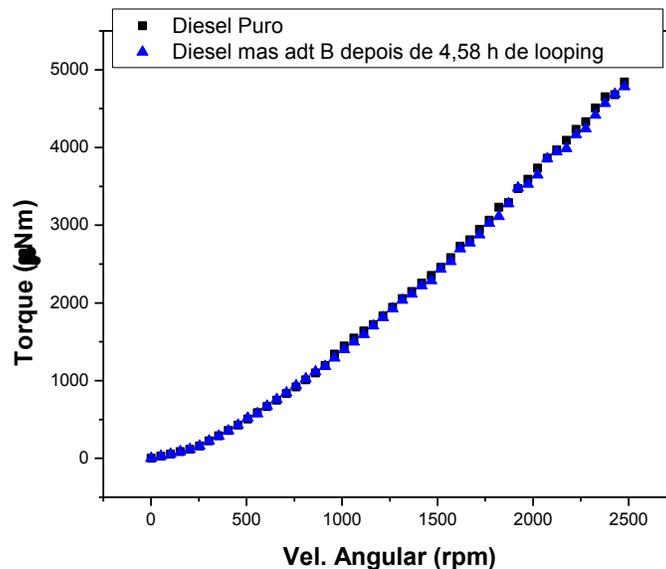


Figura 4.3: Torque em função da velocidade angular para diesel puro e diesel contaminado depois de 4 horas e 35 minutos circulando pela tubulação.

4.3. Resultados da injeção de aditivos no escoamento de óleo diesel

O valor médio das duplicatas das injeções dos Aditivos A e B nas concentrações de 10 a 50 ppm, pode ser visto na Figura 4.4. Observa-se que, para concentrações a partir de 30 ppm, o Aditivo B apresentou melhor desempenho que o Aditivo A, tal como observado no reômetro, mas para concentrações baixas (10 e 20 ppm) o Aditivo A apresenta melhor desempenho, obtendo-se

cerca de $(56 \pm 1)\%$ de redução de atrito na concentração de 20 ppm. Já o Aditivo B mostra seu melhor valor a uma concentração de 50 ppm com uma porcentagem de redução de atrito de $(58 \pm 1)\%$.

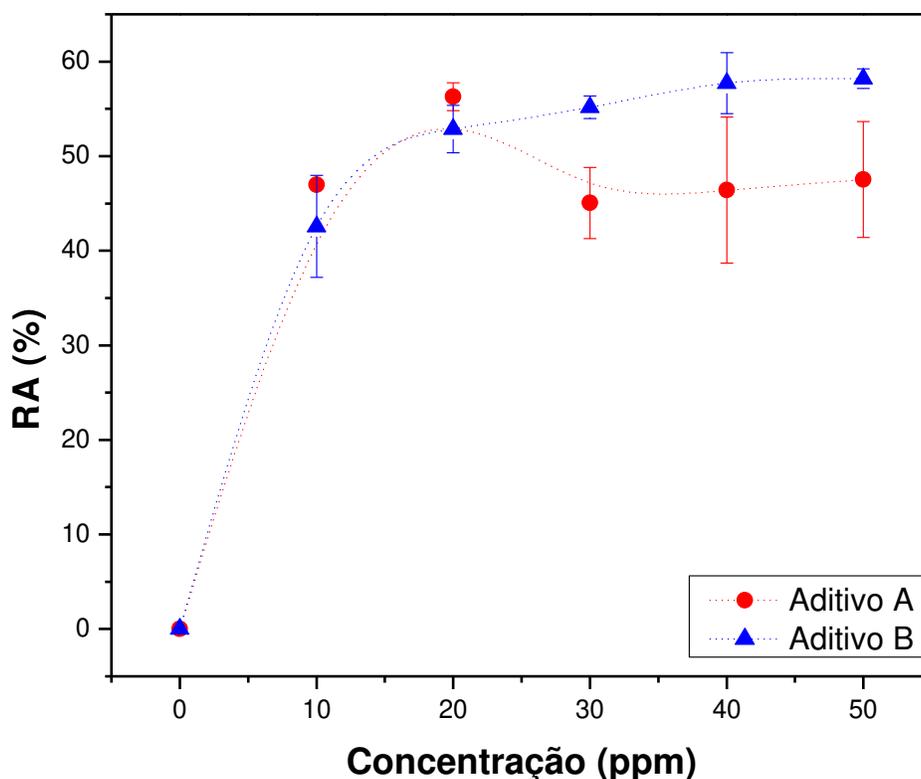


Figura 4.4: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração dos Aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a uma vazão de 260 kg/min. A linha tracejada é uma guia para os olhos.

Os dados de redução de atrito em linha mostram que, apesar do Aditivo B apresentar um maior desempenho em concentrações mais altas, o Aditivo A apresenta um pico de redução de atrito que coincide com o máximo obtido com o Aditivo B, em uma concentração menor. Porém, considerando a barra de erros para o Aditivo B nas concentrações de 10 e 20 ppm, pode-se considerar que o potencial de redução de atrito para ambos os aditivos nestas concentrações é muito próximo.

4.4. Parâmetros de comparação entre reômetro e tubulação no escoamento de óleo diesel

A literatura é escassa no que diz respeito a comparação entre uma linha de escoamento e o reômetro. Assim, nos tópicos a seguir, são feitas algumas considerações sobre parâmetros que poderiam ser considerados na comparação entre estes dois sistemas de ensaio.

4.4.1. Tensão de cisalhamento

Uma expressão para a tensão de cisalhamento na parede de uma tubulação é dada por (Fox & McDonald, 2001):

$$\tau_w = 0,0332\rho U^2 \left(\frac{v}{R_T U} \right)^{0,25} \quad (26)$$

onde V , v e R_T são a velocidade média do fluido, a viscosidade cinemática e o raio da tubulação, respectivamente. Considerando a vazão de 260 kg/min, obtém-se uma tensão de cisalhamento na parede de aproximadamente 13 Pa.

Este valor de tensão de cisalhamento no reômetro corresponde a uma rotação de aproximadamente 960 rpm. Na curva de fluxo para o Aditivo B, nesta rotação, observa-se que as forças viscosas se sobrepõem às forças inerciais, não havendo redução de atrito. As tensões de cisalhamento máximas observadas no reômetro são de aproximadamente 45 Pa para o diesel puro, 39 Pa para a solução com Aditivo A e 37 Pa para a solução com Aditivo B.

4.4.2. Taxa de cisalhamento

A partir da expressão para a tensão de cisalhamento na parede (Equação 26) pode-se obter uma relação para a taxa de cisalhamento em tubulações:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_w}{\mu} \quad (27)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do óleo diesel. Considerando a vazão de 260 kg/min, obtém-se uma taxa de cisalhamento de 3342 s⁻¹. Para a maior velocidade angular obtida no reômetro (2479 rpm), a taxa de cisalhamento é de 3200 s⁻¹.

A taxa de cisalhamento obtida na tubulação é semelhante à obtida no reômetro, e como nesta situação não foi observada uma correspondência entre estes dois sistemas, utilizar a taxa de cisalhamento também não é um parâmetro satisfatório de comparação.

4.4.3. Velocidade do óleo diesel

A velocidade do óleo diesel na situação estudada em tubulação é de 2,36 m/s. Em reômetro, esta velocidade corresponde a uma rotação de 1326 rpm, que é uma região ainda muito próxima à região dos vórtices de Taylor, para o Aditivo B (neste aditivo, a região dos vórtices de Taylor é mais longa que no Aditivo A). Por esta razão, esta região não é a mais indicada para uma medida de redução de atrito em reômetro. A velocidade máxima do diesel atingida em reômetro é de 4,41 m/s.

4.4.4. Potências dissipadas

Outro parâmetro sugerido para a comparação entre as duas técnicas é a potência dissipada pelo escoamento por unidade de massa. Em reômetro, esta quantidade é calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon_R = \frac{M\Omega}{\rho V_C} \quad (28)$$

onde M , Ω e V_C são o torque, velocidade angular e volume da cela Couette (40,1 mL), respectivamente. As potências dissipadas por unidade de massa, obtidas a partir da Equação 28, podem ser resumidas na Figura 4.5.

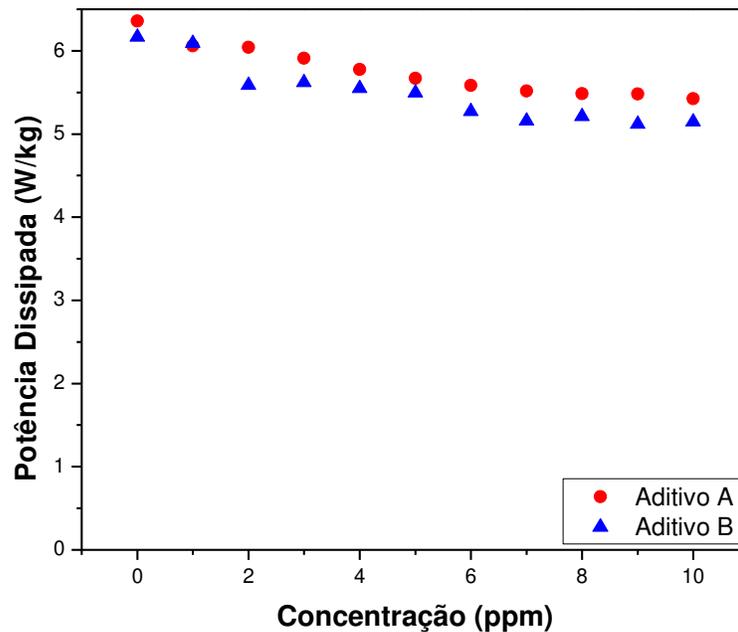


Figura 4.5: Potência dissipada em função da concentração dos Aditivos A e B em óleo diesel, analisados em reômetro, a uma velocidade angular de 2479 rpm.

Em praticamente toda a faixa de concentração, a potência dissipada do Aditivo A é ligeiramente maior que a do Aditivo B, mostrando uma relação inversamente proporcional aos valores de porcentagem de redução de atrito para as mesmas concentrações (Figura 4.6). Com a diminuição da potência dissipada, o sistema passa a ter mais energia para escoar, refletindo em um menor esforço (torque) para se atingir uma determinada velocidade angular. Este menor esforço é uma medida da redução do atrito hidrodinâmico em reômetro. Maiores porcentagens de redução de atrito implicam em uma dissipação de potência menor, observando-se a tendência para um patamar tanto na potência quanto na porcentagem de redução de atrito a cerca de 7 ppm.

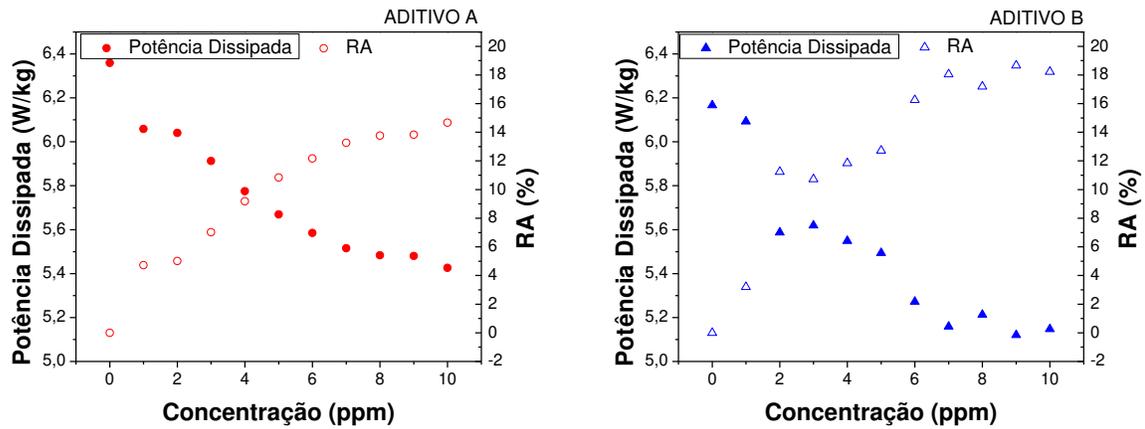


Figura 4.6: Relação entre potência dissipada e porcentagem de redução de atrito para concentrações de 1 a 10 ppm dos Aditivos A e B em reômetro.

Em tubulações, a potência dissipada por unidade de massa é dada pela equação:

$$\varepsilon_T = \frac{4}{\pi} \frac{\Delta p \cdot Q}{(\rho D)^2 L} \quad (29)$$

onde Δp é a perda de carga entre dois pontos da tubulação, Q é a vazão mássica da linha principal, D é o diâmetro da tubulação e L a distância entre os pontos de tomada de pressão. As potências dissipadas obtidas pela Equação 29 podem ser vistas na Figura 4.7.

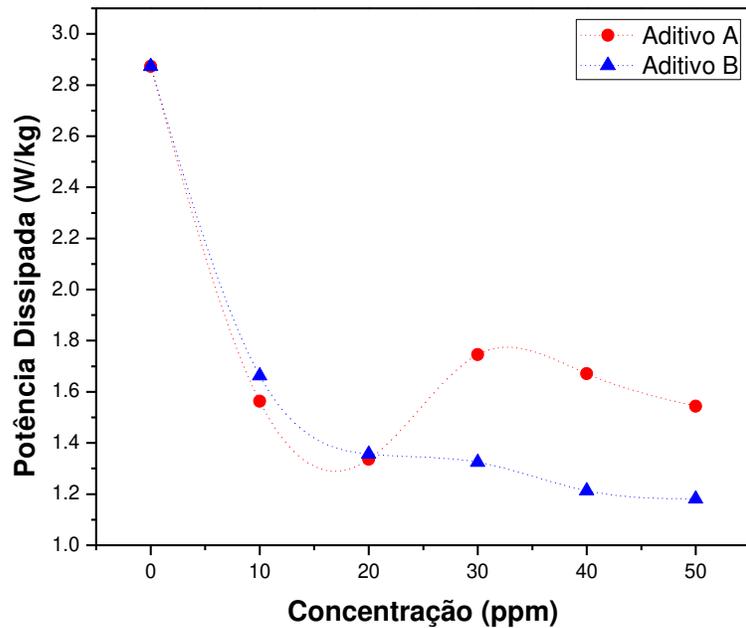


Figura 4.7: Potência dissipada em função da concentração de Aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a uma vazão de 260 kg/min. A linha tracejada é uma guia para os olhos.

Da mesma forma que observado para o reômetro, na tubulação a potência dissipada conserva uma relação inversamente proporcional à porcentagem de redução de atrito hidrodinâmico (Figura 4.8). A potência dissipada pelo diesel sem aditivo é quase duas vezes maior que a potência dissipada pelas soluções aditivadas, mostrando o ganho energético que se obtém com a adição de aditivos redutores de atrito. A dissipação de potência (por unidade de massa) em tubulação é mais de duas vezes menor que em reômetro, o que reflete as altas porcentagens de redução de atrito obtidas na tubulação. O grande efeito de parede existente na cela Couette do reômetro faz com que a energia empregada pelo rotor se dissipe proporcionalmente em maior quantidade do que na tubulação, onde o efeito de parede é notadamente bem menor.

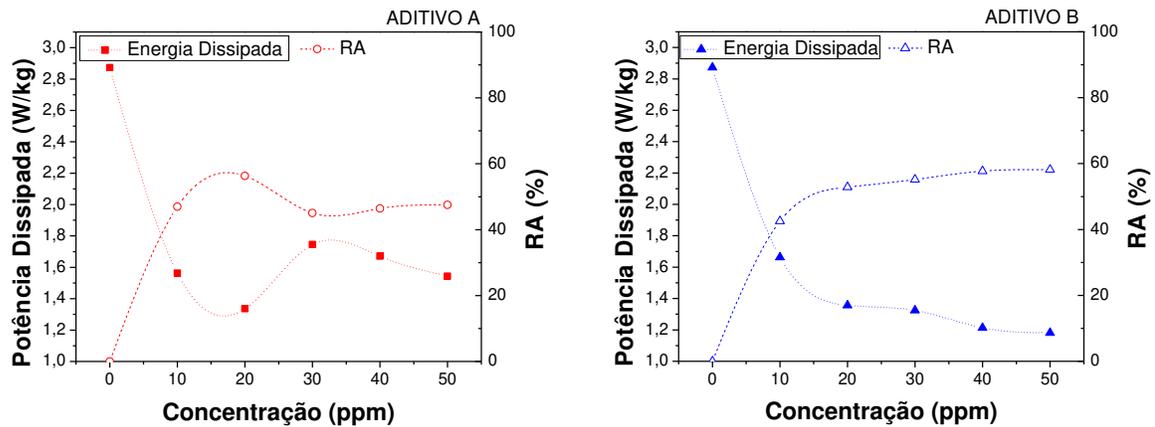


Figura 4.8: Relação entre potência dissipada e porcentagem de redução de atrito para os aditivos A e B no escoamento de óleo diesel a 260 kg/min.

4.4.5. Tamanho dos vórtices turbulentos

Movimentos turbulentos de escoamento dividem-se em grandes e pequenas escalas: enquanto as grandes escalas são diretamente influenciadas pela geometria do escoamento, as pequenas escalas são dependentes apenas da energia que recebem das grandes escalas e da viscosidade do fluido, sendo independente do escoamento global (Pope, 2000; Fukumasu, 2010). Assim, a menor escala de comprimento do movimento turbulento encontradas em um escoamento (escalas de Kolmogorov) é dado por:

$$\eta \equiv \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{0,25} \quad (30)$$

O tamanho dos vórtices turbulentos é calculado da mesma forma tanto para a tubulação quanto para o reômetro, uma vez que este parâmetro depende somente da energia dissipada pelas duas escalas. A Figura 4.9 mostra os tamanhos de vórtices obtidos para o reômetro. Observa-se que, diferentemente do que ocorre com a potência dissipada, os vórtices turbulentos são menores para o Aditivo A, que apresenta menor redução de atrito que o Aditivo B.

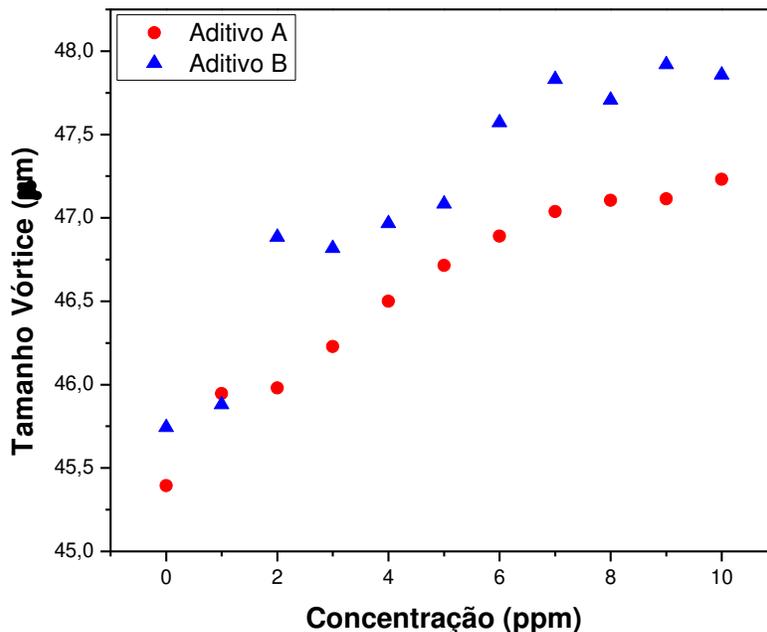


Figura 4.9: Tamanho de vórtices em função da concentração dos aditivos A e B, em reômetro.

Como previsto no modelo de Kolmogorov, vórtices menores são aqueles que dissipam a energia cinética do escoamento de um fluido. Assim, vórtices maiores (como no Aditivo B), são menos hábeis em dissipar energia, e com menos energia dissipada há mais facilidade em escoar – resultando em maiores porcentagens de redução de atrito.

Uma vez que a equação que descreve o tamanho dos vórtices é derivada de velocidade e da potencia dissipada, não é esperado que seja possível correlacionar os experimentos feitos nos dois sistemas. No entanto, é interessante determinar o tamanho dos vórtices produzidos no diesel na tubulação.

Da mesma forma, foi calculado o tamanho dos menores vórtices para a tubulação de óleo diesel, a uma vazão de 260 kg/min (Figura 4.10). Assim como em reômetro, o escoamento com o Aditivo B possui um maior tamanho de vórtice que o escoamento com o Aditivo A; porém até a concentração de 20 ppm, não há variações significativas entre ambos os aditivos (a mesma situação foi verificada para potência dissipada e porcentagem de redução de atrito).

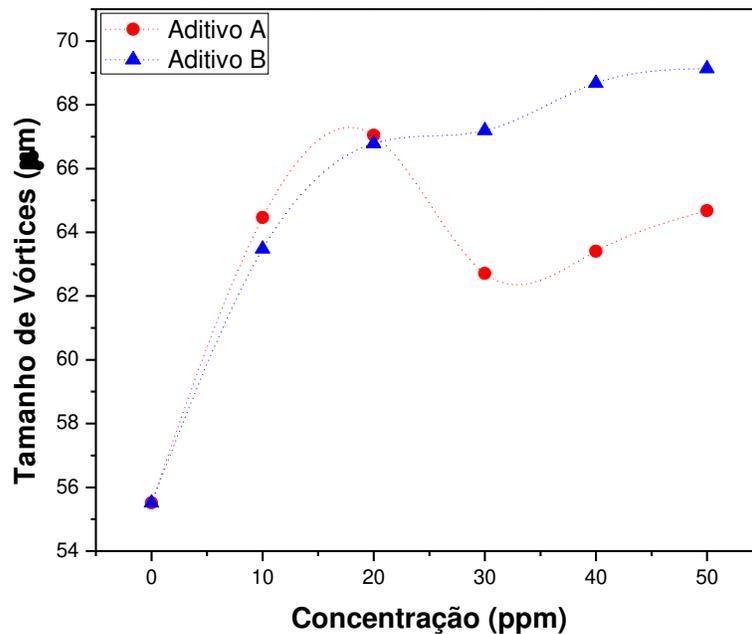


Figura 4.10: Tamanho de vórtices em função da concentração para os Aditivos A e B em tubulação. A linha tracejada é uma guia para os olhos.

Considerando o escoamento de diesel puro, do reômetro para a tubulação, o tamanho de vórtice aumenta aproximadamente 10 µm, mas não há a mesma proporção para as soluções com aditivos. Em tubulação, observa-se que com a adição dos aditivos, os vórtices aumentam em maior proporção do que em reômetro, dado o menor efeito de parede (dissipação de energia) observado em tubulação. Portanto, também em relação a este parâmetro, o estabelecimento de uma comparação entre reômetro e tubulação também não é possível

4.4.6. Porcentagem de redução de atrito

Uma relação que pode ser observada é o ponto onde o aumento da concentração de aditivo não confere em um aumento significativo da porcentagem de redução de atrito (Figura 4.11). Em reômetro, este patamar inicia-se em 10 ppm e em tubulação, em 20 ppm. No caso do reômetro, a porcentagem de redução de atrito sofre uma queda devido à sensibilidade do reômetro em perceber a ação das forças viscosas agindo no escoamento em cela Couette. No entanto,

considerando somente a faixa de aumento (significativo) da porcentagem de redução de atrito, tanto em reômetro quanto em tubulação essa faixa termina em concentrações muito próximas.

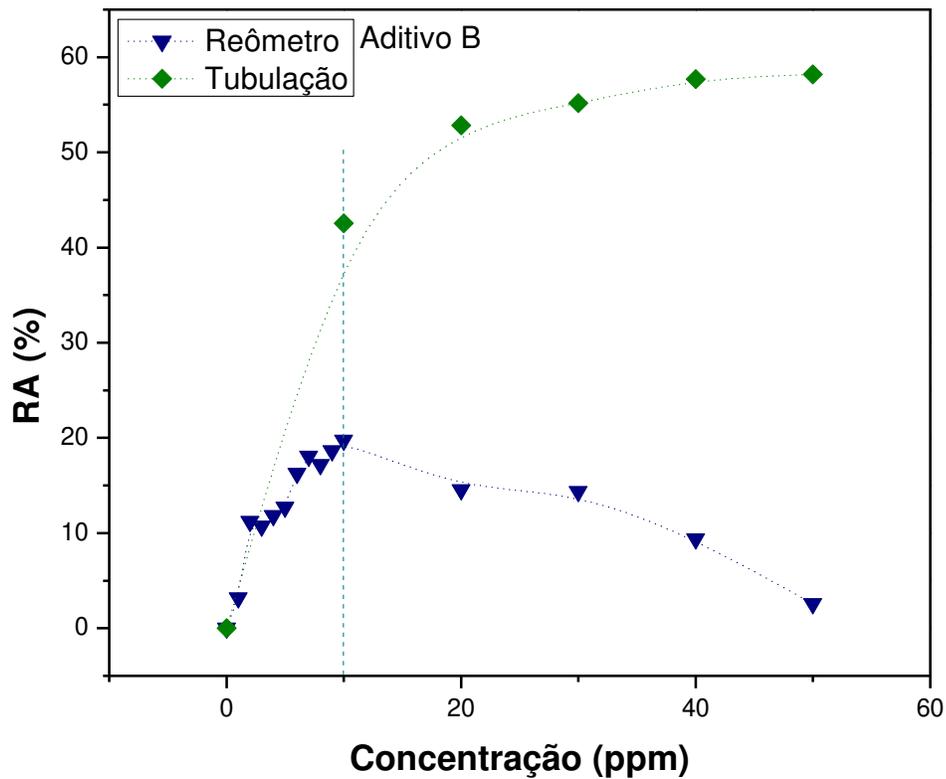


Figura 4.11: Porcentagem de redução de atrito em função da concentração de Aditivo B em reômetro e tubulação. A linha tracejada é uma guia para os olhos.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo tem o objetivo de resumir as principais conclusões do presente trabalho e expor sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões

O presente estudo investiga experimentalmente a redução de atrito hidrodinâmico em óleo diesel, propiciada pela adição de dois agentes químicos distintos, aqui denominados como A e B. O fenômeno da redução de atrito está intimamente relacionado à redução da turbulência no interior do fluido. A investigação foi realizada através de duas metodologias complementares, a saber: testes em reômetro e testes em linha de escoamento. Para os testes reométricos foi utilizado um reômetro Haake modelo RheoStress1 disponível no Instituto de Química da Unicamp, permitindo visualizar claramente os regimes laminar e turbulento no diagrama velocidade angular x torque. Para os testes em linha, foi construído um circuito horizontal de diâmetro 2 polegadas e comprimento total 75 metros no Laboratório de Petróleo-LabPetro do Cepetro-Unicamp, devidamente instrumentado para medição da vazão de diesel, sem e com agente redutor da queda de pressão, em uma seção de teste de 4 m de comprimento.

A partir desses experimentos, as seguintes conclusões e recomendações podem ser extraídas.

- ✓ *Menor volume de amostra:* Enquanto que para os experimentos em tubulação foram utilizados 2000 litros de óleo diesel, em cada ensaio em reômetro eram utilizados 40,1 ml.
- ✓ *Rapidez da medida:* Apesar da aquisição dos dados no experimento em tubulação ter uma duração de aproximadamente 40 s, após cada medida é necessário manter o diesel em circulação para a degradação do aditivo (aproximadamente 1 hora). Os experimentos em reômetro (incluindo o tempo para a troca da amostra e limpeza) têm uma duração estimada de 20 minutos.

- ✓ *Facilidade em obter níveis diferentes de turbulência:* Em uma única medida em reômetro, é feita uma rampa de velocidades angulares, o que permite uma análise em vários níveis de turbulência. Em tubulação, o nível de turbulência é modificado através da vazão; para cada medida realizada, obtém-se resultado para uma única vazão, sendo necessário realizar várias medidas para o estudo em diferentes níveis de turbulência.
- ✓ *Maior precisão na preparação das amostras:* As escalas em um circuito de tubulações são consideravelmente maiores que uma escala de laboratório, o que dificulta realizar medições precisas de volume para o preparo das soluções.

A metodologia desenvolvida no reômetro mostrou-se apenas qualitativa e não pode ser correlacionada (transportada) para um circuito. No entanto, o método reológico, é bastante apropriado para definir condições de contorno, como por exemplo, definir faixas de concentração e mesmo para comparação de eficiência de diferentes aditivos.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e considerando que inicialmente a motivação para estes estudos foi de encontrar uma relação em que seja possível transportar dados obtidos em reômetro para tubulação, sugere-se as seguintes recomendações:

- ✓ Realizar experimentos em diferentes vazões na tubulação, a fim de avaliar os efeitos dos aditivos redutores de atrito com a variação do número de Reynolds.
- ✓ Realizar experimentos na linha utilizando concentrações menores que 10 ppm e maiores que 60 ppm (para estudar melhor o efeito do redutor de atrito na tubulação).

No que diz respeito à construção do circuito, sugere-se atenção aos seguintes itens:

- ✓ Especificar a tubulação de sucção da bomba centrífuga com 3” de diâmetro (1 padrão maior que a tubulação de recalque). Este procedimento, recomendado por fabricantes de bombas, melhora o desempenho de bombas centrífugas e previne o problema de cavitação.
- ✓ Especificar a saída dos tanques no mesmo diâmetro da tubulação de sucção. Os tanques de armazenamento e descarte de diesel utilizados neste trabalho têm uma saída de 1” de diâmetro,

nas quais foram colocadas ampliações para 2". O ideal seria que a saída do tanque tivesse diâmetro igual ao da tubulação de sucção.

- ✓ Especificar tanques com chapa interna para “aparar” o fluido na entrada do mesmo: a entrada do diesel no tanque forma uma quantidade considerável de espuma, devido a agitação do sistema, que é succionada pela bomba centrífuga. Uma chapa para “aparar” o fluido faz com que este tenha uma queda mais suave, diminuindo a formação de espuma.
- ✓ Especificar tanques com volume maior. Um maior volume de óleo diesel permitiria que mais experimentos fossem realizados antes de ser necessário o procedimento de degradação do aditivo em tubulações. Além disso, poderia diminuir a quantidade de espuma succionada pela bomba centrífuga.

REFERÊNCIAS

ALYESKA PIPELINE. Pipeline Facts: Pipeline Operations. Disponível em <<http://www.alyeska-pipe.com/Pipelinefacts/PipelineOperations.html>>. Acesso em 17 de março de 2011.

BASEDOW, A. M.; EBERT, K. H. Ultrasonic degradation of polymers in solution. **Adv. Polym. Sci.** v. 22, n. 83, p. 148, 1977.

BERMAN, N. S.; GEORGE, W. K. Onset of drag reduction in dilute polymer solutions. **Phys. Fluids**, v. 17, n. 1, p. 250, 1974.

BERTI, S.; BISTAGNINO, A.; BOFFETTA, G.; CELANI, A.; MUSACCHIO, S. Small-scale statistics of viscoelastic turbulence. **Europhys. Lett.** n.76, v.1, p.63-69, 2006.

BIZOTTO, V. C. Redução do atrito hidrodinâmico em soluções de polímeros e dispersões coloidais. 2008. 173p. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BIZOTTO, V. C.; SABADINI, E. Poly(ethylene Oxide) x Polyacrylamide. Which One is More Efficient to Promote Drag Reduction in Aqueous Solution and Less Degradable? **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 110, p. 1844-1850, 2008.

BIZOTTO, V. C.; ALKSCHBIRS, M. I.; SABADINI, E. Uma revisão sobre o efeito Toms – o fenômeno onde macromoléculas atenuam a turbulência em um líquido. **Quim. Nova**, 2011.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna à diesel – a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Quim. Nova**, v. 27, p. 472-482, 2003.

BURGER, E. D.; CHORN, L. G.; PERKINS, T. K. Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing Prudhoe Bay crude oil. **J. Rheol.** n. 24 v. 5, p. 603–626. 1980.

CUENCA, F. G.; MARIN, M. G.; DIAZ, M. B. F. Energy-Savings Modeling of Oil Pipelines That Use Drag-Reducing Additives. **Energy & Fuels**, v. 22, p. 3293, 2008.

DE ANGELIS, E.; CASCIOLA, C. M.; BENZI, R.; PIVA, R. Homogeneous isotropic turbulence in dilute polymers. **J. Fluid. Mech.** v. 531, p. 1-10, 2005.

DE GENNES, P. G. **Introduction to polymer dynamics**. Cambridge University Press, 1990, 57p.

FABULA, A., G. The Toms Phenomenon in the turbulent flow of very dilute polymer solutions, 4th Int. **Congress on Rheology**, Brown U., Providence, Rhode Island, 1963.

FLORY, P. J. **Principles of Polymer Chemistry**. Cornell University Press, 1953.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. LTC, 2001, 504p.

FRANÇA, F. A.; SABADINI, E.; BIZOTTO, V. C.; PAES, D. M. Ação de redutores de atrito em escoamentos mono e bifásicos em tubulações. In: RIO OIL AND GAS 2008 EXPO AND CONFERENCE, 2008.

FUKUMASU, N. K. **Modelagem de uma Chama de Difusão Turbulenta pela Simulação de Grandes Escalas**. 2010. 138p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GOMÉZ, J. L. P. O modal rodoviário. **Ecoenergia**. n.4, 2010.

GONÇALVES, R. **Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**. Itapira: Imbil, 2010.

GOODWIN, J. W.; HUGHES, R. W. **Rheology for Chemists – An Introduction**. Royal Society of Chemistry, 2000.

GROISMAN, A.; STEINBERG, V. Elastic turbulence in a polymer solution flow. **Nature**, v. 405, p. 53, 2000.

HERSHEHY, C.; ZAKIN, J. L. A study of turbulent drag reduction of solutions of high polymers in organic solvents. Preprint 2123, Symposium on Mechanics of Viscoelastic Fluids, Part I I , 58th Meeting, **A.I.Ch.E.**, Philadelphia, Pa, 1965.

HINCH E. J. Mechanical models of dilute polymer solutions in strong flows. **Phys. Fluids**, v.20, n. 10, 1977.

HINKEBEIN, T. E. An analysis of drag reducing agents for use at the strategic petroleum reserve site at West Hackberry, Louisiana. SPR Geothermal Division, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. Projects SAND85-0045 and SAND85-2027, 1985.

HORN, A. F.; MOTIER, J. F.; MUNK, W. R. Apparent first order rate constants for degradation of a commercial drag reducing agent. In Drag Reduction in Fluid Flows: Techniques for Friction Control, **Sellin**, R. H. J., Moses, R. T., Eds.; Ellis Horwood Ltd.; Publishers: Chichester, U.K., 1989; p. 255-262.

JAPPER-JAAFAR, A.; ESCUDIER, M. P.; POOLE, R. J. Turbulent pipe flow of a drag-reducing rigid “rod-like” polymer solution. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.** n.161, p. 86-93, 2009.

JOSEPH, D. D. **Fluid Dynamics of Viscoelastic Liquids**. Springer, 755p, 1990.

KALASHNIKOV, V. N. Dynamical similarity and dimensionless relations for turbulent drag reduction by polymer additives, **J. Non-Newtonian Fluid Mech.** n.75, p.209–230, 1998.

KOTCHETKOFF NETO, A. P. Estudo de tratamento de interface proveniente de polidutos. 2010. 154p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

KULIK, V. M. Drag reduction change of polyethyleneoxide solutions in pipe flow. **Experiments in Fluids**, v.31, n. 5, p.558-566, 2001.

LANDAHL, M. T. *Z'rnceedings of the 23th International Congress on Theoretical and applied Mechanics*, E. Becker and G. K. Mikhalov, Rds. (Springer-Verlag, Berlin) p. 177, 1973.

LAROCK, B. E., JEPPSON, R. W., WATTERS, G. Z. Hydraulics of pipeline systems. **CRC Press**, 537, p. 2000.

LAUFER, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. **NACA**, n. 1174, 1954.

LOBO, M. T. G. Qualidade Garantida. **Cultivar Máquinas**. p. 8, maio/junho 2002.

LUMLEY, J. L. Drag Reduction by Additives. **Annu. Rev. Fluid Mech.**, v.1 p. 367-384, 1969.

MACOSKO, C. W. **Rheology – Principles, Measurements, and Applications**. Wiley-VCH, 1994.

MENEZES, E. W.; SILVA, R.; CATALUÑA, R.; ORTEGA, R. J. C. Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests. **Fuel**, v. 85, p. 815-882, 2006.

METZNER, A. B.; PARK, M. G. Turbulent flow characteristics of visco-elastic fluids. **J . Fluid Mech.** v. 20, p. 291, 1964.

MONIN, A. S.; YAGLOM, A. M. **Statistical Fluid Mechanics**. MIT Press, 852p. 1975.

MOTIER, J. F.; CHOU, L. C.; KOMMAREDDI, N. Commercial drag reduction: past, present and future. In 1996 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, San Diego, CA, Coleman, H., Ed., **ASME**, New York, 1996, pp. 229-234.

MOTIER, J. F.; PRITULSKI, D. J.; SHANTI, In.; KOSTELNIK, R. J. Polymeric drag reduction in petroleum products. Proceedings of the 3rd International Conference on Drag Reduction; Sellin, R. H. J., Moses, R. T., Eds.; University of Bristol: Bristol, U.K., 1984; pp 1-23

NAKKEN, T.; TANDE, M.; ELGSAETER, A. Measurements of polymer induced drag reduction and polymer scission in Taylor flow using standard double-gap sample holders with axial symmetry. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.** v. 97, n. 1, p. 1-12, 2001.

PIPE, C. J.; MONKEWTIZ, P. A. Vortex shedding in flows of dilute polymer solutions. **J. Non Newtonian Fluid Mech.** v. 139, p. 54, 2006.

POPE, S. B. Turbulent Flows. **Cambridge University Press**, Cambridge, New York, EUA, 2000.

RABECKI, F.; HENRIST, M.; WILDÉRIA, D.; CUENCA, F. G. Shearing of drag reducing polymers in fuel oil pipelines with ultrasonic methods: A feasibility study. **J. Appl. Polym. Sci.**, n. 100, p. 4723–4728. 2006.

ROUSE, P. E. A Theory of the Linear Viscoelastic Properties of Dilute Solutions of Coiling Polymers. **J. Chem. Phys.** n.7, v.21, 1953.

SAVINS, J. G. Drag reduction characteristics of solutions of macromolecules in turbulent pipe flow. **Soc. Petrol. Eng. J.** 4, 203, 1964.

SILVA, M. A. da; ROCHA, N. de O.; CARVALHO, C. H.; SABADINI, E. New experimental technique to measure the efficiency of drag reducer additives for oil samples. **Energy Fuels**, n.23, p.4529-4532, 2009.

SMITH, D. E.; CHU, S. Response of Flexible Polymers to a Sudden Elongational Flow. **Science**, n.281, p.1335, 1998.

SOARES, A. C.; LEAL, J. E.; AZEVEDO, Í. R. Diagnóstico da rede de distribuição de derivados de petróleo no Brasil e sua representação em um SIG. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, MG, Brasil.

SREENIVASAN, K. R.; WHITE, C. M. The onset of drag reduction by dilute polymer additives, and the maximum drag reduction asymptote. **J. Fluid. Mech.** v.409, p.149-164, 2000.

TABOR, M.; DE GENNES, P. G. A cascade theory of drag reduction. **Europhys. Lett.** v. 2, n.7, p.519-522, 1986.

TANFORD, D. The Physical Chemistry of Macromolecules. New York: **John Wiley**, 1961.

TAYLOR, G. I. Correlation measurements in a turbulent flow through a pipe. **Proc. R. Soc. London**, v. 157, n. A892, p. 537-546, 1936.

TERAOKA, I. Polymer Solutions – An Introduction to Physical Properties. New York: **John Wiley**, 2001.

TN PETRÓLEO. Maior poliduto do país completa 10 anos. Brasil: TN Petróleo; 02 de Agosto de 2006 [acesso em 10 de Fevereiro de 2011].

THERMO HAAKE. **Instruction Manual RotoVisco 1 RheoStress 1**. Part No. 003-5213e, 2-1-103-2, 03.2003.

TOMS, B. A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. Proc. 1st Int. **Congress on Rheology**, vol. 11, pp. 135-41. North Holland Publ. Co. 1948.

TRUONG, T. Drag Reduction Technologies. **DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory**. Australia, 2001.

VIRK, P. S. Drag reduction in rough pipes. **J. Fluid Mech.** n. 45, p. 225–246, 1971

VIRK, P. S. Drag reduction fundamentals. **AIChE J.** n. 21 v. 4, p. 625–656, 1975.

VIRK, P. S.; MERRILL, E. W.; MICKLEY, H. S.; SMITH, K. A.; MOLLO-CHRISTENSEN, E. L. The Toms phenomenon: Turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. **J. Fluid Mech.** v. 30, p. 305, 1967.

VIRK, P. S., MERRILL, E. W., MICKLEY, H. S. & SMITH, K. A. The Critical wall shear stress for reduction of turbulent drag in pipe flow, in *Modern Developments in the Mechanics of Continua*, S . **Eskanazi**, Ed. New York: Academic Press, 1965.

ZIMM, B. H. Dynamics of polymer molecules in dilute solutions: viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss. **J. Chem. Phys.** v. 24, n. 2, p. 269, 1956.

ANEXO I

Tabela I.1: Calibração do medidor mássico de vazão para a linha de óleo diesel, efetuado pelo fabricante. Data da calibração: 18/Junho/2009.

Vazão (kg/min)	Erro (%)
900,27	0,07
751,89	-0,10
550,46	0,19
350,22	0,18
150,05	0,14
89,77	0,07

Tabela I.2: Calibração do medidor mássico de vazão para a solução estoque de aditivo, efetuado pelo fabricante. Data da calibração: 09/Setembro/2008.

Valor verdadeiro convencional (kg/h)	Valor médio indicado pelo instrumento (kg/h)
16341,521	16325,000
8167,394	8162,500
1634,712	1632,500

Tabela I.3: Calibração do transmissor de pressão, efetuado pelo fabricante. Data da calibração: 19/Janeiro/2010.

Valor de referência (mbar)	Valor lido (mA)
0,00000	3,9999
25,39610	8,0524
49,81550	11,9618
75,21160	16,0293
99,63100	19,9402

Tabela I.4: Calibração da termorresistência utilizada na linha de óleo diesel, efetuada no LabPetro. Data da calibração: 29/Setembro/2010.

Tensão (V)	Temperatura (°C)
1,78773	19,90
2,18658	29,99
2,57154	39,72
2,95719	49,41

ANEXO II

Conjunto Moto Bomba Modelo: MEGACHEM 40-200

Dados Operacionais:

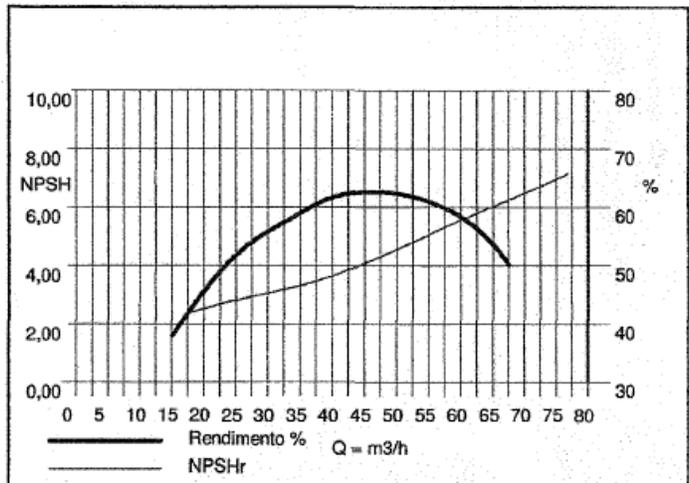
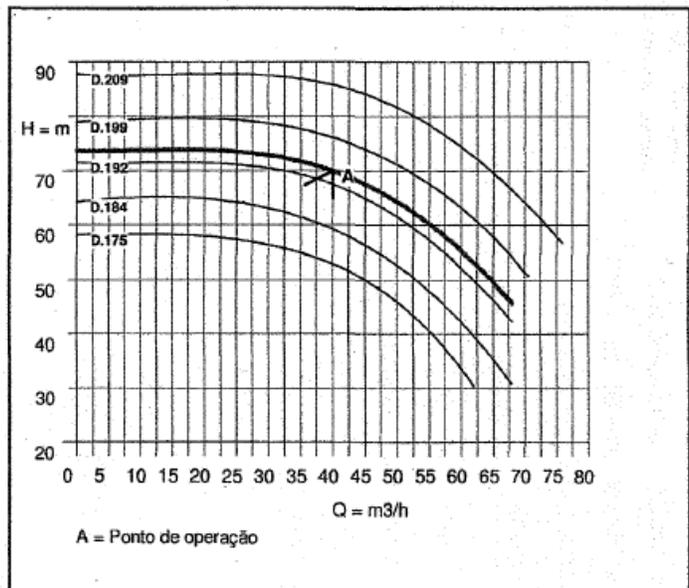
Vazão	: 40,00	m ³ /h
Amt	: 70,00	m
NPSH (Requerido)	: 3,65	m
Rendimento	: 62,00	%
Diam. Rotor Projeto	: 194	mm
Líquido Bombeado	: ÓLEO DIESEL	
Temperatura	: 25	C
Densidade	: 0,800	Kgf/dm ³
Velocidade	: 3500	rpm
Viscosidade	: 1,00	cSt
Potência Consumid:	13,40	CV

Dados Construtivos:

Diam. Sucção	: 65mm
Posição	: HORIZONTAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Diam. Recalque	: 40mm
Posição	: VERTICAL
Classe Pressão	: 125# FF
Norma	: ANSI B16.1
Construção	: PÉS
Mancais	: ROLAMENTOS
Lubrificação	: ÓLEO
Rotação(v.l.acion)	: Horário
Base	: Estrutural
Luva Elástica	: E97
Motor	: WEG/PROV.EXPL.
	20 HP / IP55 / 160M / 220/760V / Trifásico
Vedação	: Selo Mecânico

Materiais:

Carcaça	: A48CL30
Rotor	: A48CL30
Eixo	: SAE1045
Luva Protetora Eixo	: AISI316
Anel de Desgaste	: A48CL30



base-a , Serviço de conjugação