

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por João Crisóstomo
de Queiroz Neto e aprovada
pela comissão julgadora em 20/12/1993.

Sandra Rocha
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à

Faculdade de Engenharia Mecânica

Como Requisito Parcial para a Obtenção do

Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

ESCOAMENTO TUBULAR E ANULAR DE FLUIDO DE
PERFURAÇÃO COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA:
EFEITO DA REDUÇÃO DE ARRASTE

Autor : João Crisóstomo de Queiroz Neto n.º 32

Orientadora : Sandra Cristina dos Santos Rocha

Co-orientador : Cesar Costapinto Santana

Dezembro de 1993

68/93

Apresentar

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Escoamento Tubular e Anular de Fluido de Perfuração com Adição de Poliacrilamida - Efeito da Redução de Arraste" elaborada por João Crisóstomo de Queiroz Neto foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 20 de dezembro de 1993.

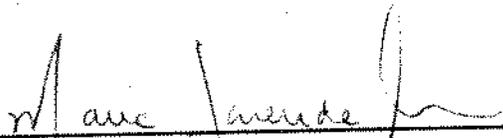
Banca Examinadora



Sandra Cristina dos Santos Rocha, Doutora



Antonio Celso Fonseca de Arruda, Doutor



Maria Aparecida Silva, Doutora

Esse trabalho é dedicado à minha mãe Janir e ao meu tio Prof. Francolino Neto,

pelo carinho, dedicação e confiança no meu potencial.

À minha esposa Maria José e à minha filha Jordana,

por sempre me apoiarem tanto nos momentos bons quanto nos difíceis.

Agradecimentos

- À Prof. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela excelente orientação, incentivo, compreensão e amizade.
- Ao Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana pela co-orientação e amizade
- Aos amigos André Leibsohn Martins, Carlos Henrique Marques de Sá e Maria das Graças Pena Silva, pelo estímulo, boas sugestões e proveitosas discussões, durante a realização deste trabalho.
- Ao corpo docente da FEM/DEP/UNICAMP e em particular ao Prof. Dr. Celso Arruda pelo apoio concedido.
- Aos funcionários e colegas da FEM/DEP/UNICAMP pelo frutífero convívio.
- À PETROBRÁS/CENPES/DILOT/SEPEF e em particular aos engenheiros Maurício Aguiar de Almeida e Ielton Frederico da Ponte, pelo apoio concedido quando da realização dos experimentos naquele órgão.
- À PETROBRÁS/DEPER/DPBA, e em particular aos engenheiros Ricardo Pompeu do Amaral, José Lindenberg, Marcelo Restum e Manuel Martins de Oliveira, pelo incentivo e apoio concedido para a realização deste trabalho.
- À PETROBRÁS pela oportunidade e suporte financeiro.
- A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

Sumário

Lista de Tabelas-----	vi
Lista de Figuras-----	viii
Nomenclatura-----	xiv
Resumo-----	xix
1. Introdução-----	1
2. Revisão Bibliográfica-----	6
2.1. Redução de Fricção-----	6
2.1.1. Introdução-----	6
2.1.2. Histórico-----	7
2.1.3. Conceitos Básicos sobre Redução de Arraste Friccional-----	10
2.1.4. Escoamento Turbulento em Tubos	12
2.1.5. Máxima Redução de Arraste Friccional	20
2.1.6. Polímeros	20
2.1.7. Degradação de Polímeros	24
2.1.8. Influência da Rugosidade na Redução do Arraste Friccional	27
2.2. Perfis de Velocidades Durante o Escoamento de Fluidos com Redução de Arraste	29
2.2.1. Em Tubos:	29
2.2.2. Anular entre Tubos	32

2.3. Reologia	33
2.3.1. Fluidos Newtonianos	34
2.3.2. Fluidos Não Newtonianos	36
2.3.2.1. Fluidos Não Newtonianos Independentes do Tempo	39
2.3.2.2. Fluidos Não Newtonianos Dependentes do Tempo	50
2.4. Fluido de Perfuração	52
3. Aparato Experimental	57
3.1. Simulador Hidráulico de Superfície	58
3.1.1. Instalação Piloto	59
3.2. Preparação e Movimentação da Solução	62
3.3. Determinação dos Diâmetros Internos dos Tubos	62
3.4. Teste do SHS com Água	63
3.5. Obtenção das Medidas: Queda de Pressão - Vazão	64
3.6. Viscosímetro Rotativo	66
4. Tratamento dos Dados Experimentais e Discussão dos Resultados	72
4.1. Caracterização Reológica dos Fluidos Utilizados	72
4.2. Número de Reynolds Generalizado	85
4.3. Cálculo dos Fatores de Fricção	85
4.3.1. Fatores de Fricção nos Tubos	85
4.3.2. Fatores de Fricção no Anular	86

4.4. Quantificação do Percentual de Redução de Fricção	87
4.5. Programas Computacionais Usados no Tratamento de Dados	87
4.6. Discussão dos Resultados	88
4.6.1. Escoamento do Fluido de Perfuração no Tubo de 2,54 cm	88
4.6.2. Escoamento do Fluido de Perfuração no Tubo de 3,18 cm	107
4.6.3. Escoamento do Fluido de Perfuração Através do Anular 7,62/5,08cm	119
5. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	138
5.1. Conclusões	138
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	140
Referências Bibliográficas	141
Abstract	150
Apêndice A	151
Apêndice B	160

Lista de Tabelas

- Tabela 3.1 Dimensões e capacidades principais do simulador SHS
- Tabela 3.2 Arranjo real poço versus revestimento, cm
- Tabela 3.3 Valores medidos e especificados dos diâmetros das tubulações
- Tabela 3.4 Especificação do viscosímetro Fann
- Tabela 3.5 Verificação da calibração do viscosímetro
- Tabela 3.6 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o tubo de 2,54 cm e propriedades reológicas
- Tabela 3.7 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o tubo de 3,18 cm e propriedades reológicas
- Tabela 3.8 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o anular e propriedades reológicas
- Tabela 4.1 Parâmetros estatísticos dos modelos reológicos, para o solvente
- Tabela 4.2 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 1284 ppm de poliacrilamida hidrolisada
- Tabela 4.3 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 1854 ppm de poliacrilamida hidrolisada
- Tabela 4.4 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 2853 ppm de poliacrilamida hidrolisada
- Tabela 4.5 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 4280 ppm de poliacrilamida hidrolisada
- Tabela 4.6 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 5706 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Tabela 4.7	Parâmetro estatístico para o solvente contendo 7133 ppm de poliacrilamida hidrolisada
Tabela 4.8	Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de Reynolds generalizado, tubo de 2,54 cm
Tabela 4.9	Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de Reynolds generalizado, tubo de 3,18 cm
Tabela 4.10	Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de Reynolds generalizado, anular
Tabelas A.1	Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o tubo de 2,54 cm(1")
Tabelas A.2	Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o tubo de 3,18 cm(1¼")
Tabelas A.3	Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o anular de 7,62/5,08 cm(3"/2")

Lista de Figuras

- Figura 2.1 f versus Re para o escoamento de uma solução polimérica, através de um tubo liso
- Figura 2.2 Efeito da concentração do polímero redutor de fricção no escoamento de uma solução polimérica aquosa
- Figura 2.3 Efeito do diâmetro do tubo no escoamento de uma solução aquosa com polímero redutor de fricção
- Figura 2.4 Degradação mecânica ocorrida no escoamento de uma solução aquosa com polímero redutor de fricção à medida que eleva-se o Re e mantém-se a concentração fixa, num tubo de diâmetro reduzido
- Figura 2.5 Variação de %R com a concentração do polímero redutor de arraste, para Re fixo
- Figura 2.6 Cadeia linear
- Figura 2.7 Cadeia ramificada
- Figura 2.8 Cadeia de um copolímero
- Figura 2.9 Influência do diâmetro do tubo na degradação mecânica do polímero redutor de fricção, numa solução aquosa
- Figura 2.10 Escoamento entre placas deslizantes
- Figura 2.11 Classificação reológica dos fluidos
- Figura 2.12 Reograma de um fluido de Bingham
- Figura 2.13 Reograma de fluidos não newtonianos independentes do tempo
- Figura 2.14 Reograma de um fluido de Casson
- Figura 2.15 Reograma de um Fluido de Herschel-Bulkley

-
- Figura 2.16 Reograma de fluidos não newtonianos dependentes do tempo
- Figura 2.17 Sistema de circulação em uma perfuração rotativa
- Figura 3.1 Instalações do Simulador Horizontal de Superfície (SHS)
- Figura 3.2 Diagrama esquemático do simulado horizontal de superfície (SHS)
- Figura 3.3 Vazão versus valores de perda de carga teórico e experimental, respectivamente, no escoamento de água à 25° C
- Figura 3.4 Vazão versus rotação, para a bomba do SHS
- Figura 3.5 Vazão versus rotação, para a bomba do SHS
- Figura 4.1 Reograma do solvente ajustado pelo modelo Robertson-Stiff
- Figura 4.2 Reograma do solvente contendo 1284 ppm de poliacrilamida e ajustada pelo modelo de Herschel-Bulkley
- Figura 4.3 Reograma do solvente contendo 1854 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff
- Figura 4.4 Reograma do solvente contendo 2852 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Potência
- Figura 4.5 Reograma do solvente contendo 5704 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff
- Figura 4.6 Reograma do solvente contendo 7130 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff
- Figura 4.7 Influência da concentração de poliacrilamida hidrolisada na reologia do solvente
- Figura 4.8 Efeito da degradação no solvente contendo 1426 ppm de poliacrilamida hidrolisada

-
- Figura 4.9 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada e dados experimentais para o solvente, dados experimentais para a concentração de 713 ppm e curva de Ataíde, usando o tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.10 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1141 ppm e 1284 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.11 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1854 ppm e 2140 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.12 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$ curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2282 ppm e 2853 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.13 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 4280 ppm e 4993 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.14 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 5706 ppm e 7133 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.15 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva de Ataíde, curva ajustada e dados experimentais para as concentrações escolhidas para análise, usando tubo de 1" (2,54 cm)
- Figura 4.16 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente contendo dados experimentais para as concentrações escolhidas, usando tubo de 1" (2,54 cm)

-
- Figura 4.17 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1141 ppm
- Figura 4.18 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1283 ppm
- Figura 4.19 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1854 ppm
- Figura 4.20 %R em função número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 2852 ppm
- Figura 4.21 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 4278 ppm
- Figura 4.22 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 5704 ppm
- Figura 4.23 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada dados experimentais para o solvente, dados experimentais para o solvente contendo 713 ppm e a curva de Ataíde, usando tubo de de 1¼" (3,18 cm)
- Figura 4.24 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2282 ppm e 2853 ppm, respectivamente, usando tubo de 1¼" (3,18 cm)
- Figura 4.25 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 4280 ppm e 5706 ppm, respectivamente, usando tubo de 1¼" (3,18 cm)

-
- Figura 4.28 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼"(3,18 cm): conc. 1141 ppm
- Figura 4.29 %R em função número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼"(3,18 cm): conc. 1569 ppm
- Figura 4.30 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼" (3,18 cm): conc. 2282 ppm
- Figura 4.31 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼" (3,18 cm): conc. 2852 ppm
- Figura 4.32 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼" (3,18 cm): conc. 4278 ppm
- Figura 4.33 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada e dados experimentais para o solvente, dados experimentais para o solvente contendo 713 ppm e a curva de Paixão, usando o anular
- Figura 4.34 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1141 ppm e 1284 ppm, respectivamente, usando o anular
- Figura 4.35 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1854 ppm e 2282 ppm, respectivamente, usando o anular
- Figura 4.36 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2853 ppm e 4280 ppm, respectivamente, usando o anular
- Figura 4.37 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 5706 ppm e 7133 ppm, respectivamente, usando o anular

-
- Figura 4.38 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva de Paixão, curva ajustada e dados experimentais para as concentrações escolhidas para análise, usando o anular
- Figura 4.39 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente e dados experimentais para diversas concentrações, usando o anular
- Figura 4.40 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 713 ppm
- Figura 4.41 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 1141 ppm
- Figura 4.42 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 1283 ppm
- Figura 4.43 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 1854 ppm
- Figura 4.44 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 2852 ppm
- Figura 4.45 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular: conc. 5704 ppm
- Figura 4.46 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: dados experimentais para a concentração de 7130 ppm, para os tubos de 1" (2,54 cm), 1¼ (3,18 cm) e anular 3"/2"
- Figura 4.47 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: efeito do diâmetro, usando a concentração de 1283 ppm
- Figura 4.48 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: efeito do diâmetro, usando a concentração de 2852 ppm

Nomenclatura

A	Parâmetro reológico do modelo Robertson-Stiff, Pa
A_1	Parâmetro usado na equação (2.12) e definida nas relações (2.13) e (2.14)
B	Parâmetro do modelo Robertson-Stiff
C	Parâmetro reológico do modelo Robertson-Stiff, 1/s
D_{eq}	Diâmetro equivalente, m
e	Tensor taxa de deformação, Pa
e_{ij}	Componente do tensor taxa deformação, Pa
D	Diâmetro do tubo, m
De	Número de Deborah
D_e	Diâmetro interno do tubo externo, no anular, m
D_i	Diâmetro externo do tubo interno, no anular, m
f	Fator de fricção de Fanning
f_p	Fator de fricção do solvente contendo o redutor de fricção
f_s	Fator de fricção do solvente puro
h_M	Comprimento médio das moléculas de um polímero, com formação de ângulos entre os átomos, m
H_e	Número de Hedstrom
h_{EX}	Comprimento completamente estendido, m
I	Matriz identidade
L	Comprimento das ligações químicas, m

L	Comprimento do tubo, m
N	Número de ligações atômicas de comprimento L
n	Índice de fluxo, para os modelos reológicos Potência, Herschel-Bulkley
ΔP	Diferencial de pressão, Pa
ΔJ_P	Diferencial de pressão no solvente contendo o redutor de fricção, obtido à mesma pseudo-taxa de deformação, usado na equação (2.2), Pa
ΔJ_S	Diferencial de pressão no solvente puro, obtido à mesma pseudo-taxa de deformação, usado na equação (2.2), Pa
ΔP_F	Queda de pressão para o solvente puro, Pa
ΔP_P	Queda de pressão para o solvente contendo o redutor de fricção, Pa
Pf	Alcalinidade do filtrado
%R	Percentual de redução de fricção do fluido
r_m	Raio da máxima velocidade no ânulo, m
r_0	Raio do tubo externo de um ânulo, m
T	Tensor tensão, Pa
T_{XX}, T_{YY}, T_{ZZ}	Componentes normais do tensor tensão, Pa
T_{XY}, T_{YZ}, T_{XZ}	Componentes cisalhantes do tensor tensão, Pa
T_{ZY}, T_{ZX}, T_{YX}	Componentes cisalhantes do tensor tensão, Pa
Tf	Tempo característico do fluido, s
Te	Tempo característico do escoamento, s
r	Posição radial, em tubo e anular, m

R	Raio do tubo, m
R^*	Número de Reynolds usando a velocidade friccional, m/s
Re	Número de Reynolds, usando a viscosidade efetiva proposta por Ohen
Re_{RS}^*	Número de Reynolds generalizado, proposto por Paixão
Re_S	Número de Reynolds proposto por Ataíde
y	Distância de um ponto do fluido, à parede do tubo, m
y_L^+	Espessura da subcamada limite, m
y_E^+	Espessura da subcamada elástica, proposta por Virk, m
y^+	Distância usada no número de Reynolds $\frac{yu^*\delta}{u}$, m
$y_{laminar}$	Comprimento qualquer, dentro do comprimento da camada limite, $0 < y_{laminar} < y_L$, m
y_L	Comprimento total da zona laminar da camada limite, relativa à parede do tubo, m
u	Velocidade média do escoamento em um ponto do fluido com redução de fricção, m/s
U_{max}	Velocidade máxima média em um ponto do fluido, m/s
$u_{critica}^*$	Velocidade de fricção, no ponto de <i>tensão cisalhante critica</i> , m/s
u_θ^+	Velocidade adimensional, na região mais externa do ânulo
p	Pressão hidrostática, Pa
u^+	Velocidade adimensional, definida como $\frac{u}{u^*}$
u^*	Velocidade de fricção, m/s
\bar{V}	Velocidade média do escoamento, m/s

\bar{V}_c	Velocidade crítica proposta por Ataíde, m/s
\bar{V}_{AN}	Velocidade anular, m/s
Q	Vazão, m ³ /h

Símbolos Gregos

α	Coefficiente da equação (2.13) e função do número de Deborah
α	Parâmetro usado para levar em conta a afinidade
α^*	Parâmetro de medida da eficiência da redução de fricção de um fluido
β	Coefficiente da equação (2.13) e função do número de Deborah
β	Comprimento das ligações entre átomos, obtido experimentalmente
γ	Distância adimensional, relativa à parede do tubo, m
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento, 1/s
δ	Espessura da camada limite, m
δ_{ij}	Operador delta de Kronecker
λ	Tempo de relaxamento, s
λ	Viscosidade de um fluido newtoniano compressível, Pa.s
λ	Posição radial na qual a tensão de cisalhamento no fluido se iguala à tensão residual, m
λ_1	Tempo de relaxamento (s)
λ_2	Tempo de relaxamento (s)
λ_1 e λ_2	Parâmetros adimensionais definidos pela equação (2.14)
μ	Viscosidade do fluido, Pa.s

μ_e	Viscosidade efetiva, Pa.s
μ_0	Parâmetro de viscosidade para o modelo de Maxwell
η_p	Viscosidade plástica, Pa.s
π	Raio menor que o raio R, para o perfil de velocidade, usando o modelo
π	Posição radial, m
ρ	Massa específica do fluido, Kg/m ³
τ_{ij}	Tensor tensão extra, Pa
τ_{HB}	Tensão residual para o modelo Herschel-Bulckey, Pa.s
τ_{RS}	Tensão residual para o modelo Robertson-Stiff, Pa.s
τ_{wf}	Tensão cisalhante de parede, para o solvente com redutor de fricção, Pa
τ_{ws}	Tensão cisalhante de parede, para o solvente puro, Pa
τ_Y	Tensão residual, Pa.s

Números Adimensionais

De	Número de Deborah: T_f/T_e
H'_e	Número de Hedstron modificado: $\frac{\rho D^2}{A} C^{b-H} g$
Re	$\frac{\rho \bar{V} D_{eq}}{\mu_e}$
Re _{SR}	Número de Reynolds generalizado: $\frac{8\rho \bar{V}^2}{A \left[\left(\frac{3B+1}{4B} \right) \frac{8\bar{V}}{D} + \frac{4C}{3} \right]^B}$

Resumo

Este trabalho é um estudo experimental do fenômeno de redução de fricção no escoamento do fluido de perfuração salgado, contendo poliacrilamida hidrolisada em tubos de 1" (2,54 cm), 1 1/4" (3,18 cm), e no anular de 3/2" (7,62/5,08 cm).

Neste estudo, analisou-se o comportamento reológico do fluido de perfuração com concentrações de poliacrilamida entre 0 e 7133 ppm, tendo sido verificado que o modelo reológico de Robertson-Stiff descreve melhor o comportamento reológico destes fluidos para a faixa de deformação pesquisada.

Os resultados experimentais do escoamento turbulento em tubos e ânnulos foram utilizados para analisar o fenômeno de redução de fricção, através do estudo da influência da geometria, concentração de poliacrilamida hidrolisada, degradação, etc, nos fatores de fricção dos fluidos. Correlações empíricas, tipo Blasius, foram desenvolvidas para escoamento turbulento do solvente através dos tubos e ânnulo estudados.

O fenômeno de redução de arraste foi observado e quantificado para o intervalo de concentração de poliacrilamida hidrolisada analisada. Além disso foi estudada a influência da degradação mecânica desse polímero do ponto de vista qualitativo.

Foi observado que a funcionalidade da poliacrilamida hidrolisada como redutor de fricção, para o fluido de perfuração salgado, limita-se à faixa de concentração de 713 a 2853 ppm. Além disso, maiores percentuais de redução de fricção foram obtidos para concentrações entre 1141 e 1426 ppm.

CAPÍTULO 1

Introdução

O fluido de perfuração desempenha um importante papel na operação de perfuração de um poço. Através deste são realizados a limpeza e posterior remoção dos sólidos perfurados, o resfriamento da broca e coluna de perfuração em constante atrito com as formações, o controle das pressões de subsuperfície através de adequada coluna hidrostática de fluido, a manutenção das paredes dos poços em boas condições de estabilização até que sejam revestidas e muitas outras funções. Os fluidos de perfuração são classificados em diversos grupos mas o principal é o grupo dos fluidos a base de água. Os outros grupos apresentam menos participações por razões diversas tais como: restrições ecológicas e ambientais, econômicas e operacionais. Os fluidos de perfuração a base de água são classificados em:

- Convencional: fluido viscoso preparado com água, argila ativada e pH entre 9,0 e 9,5;
- Disperso: inibidos fisicamente por dispersantes químicos que mantêm as argilas reativas dispersas no sistema.
- Inibidos: são aqueles em que a inibição química é promovida por íons tais como potássio, cálcio, sódio, etc.
- Baixo teor de sólidos: são fluidos que apresentam um teor de sólidos inferior a 4% em volume quando do seu preparo.
- Fluidos especiais: nesta classe podem ser colocados aqueles que não se encaixam em nenhuma dessas categorias tais como fluidos tratados com asfalto e materiais obturantes, à base de água emulsionada, etc. Vale ressaltar que dentro dessas classes existem ainda subdivisões. Por exemplo, os fluidos inibidos podem ser subdivididos em à base de cal,

salgados, salgados com polímero, etc. Numa outra subdivisão, os salgados podem ser salgados com baixa, média e alta salinidade e assim por diante. Entretanto, o grupo dos fluidos salgados com NaCl/polímero tem tido uma grande utilização, principalmente na bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro. Isto porque estes apresentam boa performance e relação custo/benefício. A composição média destes é:

- Água: qsp
- Argila ativada: 19972ppm (viscosificante e redutor de filtrado)
- Soda Cáustica: 2140 a 2853 ppm (alcalinizante)
- CMC-ADS: 2282 -2853 ppm (redutor de filtrado e viscosificante)
- Amido: 11408 ppm (redutor de filtrado e viscosificante)
- Sal NaCl: 68448 ppm (inibidor de folhelho)
- Poliacrilamida hidrolisada: 2853 a 4280 ppm (adensante)
- Bactericida: 1426 ppm (inibe o processo de fermentação no fluido). Para essa composição média as propriedades médias obtidas são:
 - Viscosidade plástica: 0,01414 Pa.s
 - Limite de Escoamento: 6,70 Pa
 - Geis inicial/final: 6,70/13,41 Pa
 - Filtrado API: $9,0 \times 10^6 \text{m}^3$
 - pH: 9,0
 - P_f: $1,55 \times 10^6 \text{m}^3$
- Peso específico: 1140,0 kg/m³.

À medida que foi se intensificando o seu uso, principalmente na bacia de Campos, foram surgindo anormalidades durante as operações de perfuração. Apesar de constatar-se

circulações normais do fluido através do sistema de circulação, os medidores de pressão acusaram reduções bem representativas na superfície. Diante deste fato, algumas vezes foram interrompidas as atividades de perfuração e algumas vezes foi retirada a coluna de perfuração para verificação de eventual problema, tal como furos nos tubos, etc.

Tal problema foi então estudado por Martins e Marques de Sá[44] no Centro de Pesquisas da Petrobrás. O trabalho de Martins e Marquês de Sá[44] foi realizado tanto no campo quanto nos laboratórios do centro de pesquisa. No teste de campo eles verificaram a ocorrência do fenômeno à medida que aumentava-se a concentração da poliacrilamida hidrolisada no fluido salgado e, em particular, após adição correspondente à concentração de 4993 ppm obtiveram uma redução de pressão em torno de 25,67 kg/cm². O poço acompanhado estava perfurando a fase de 21,59 cm (8 1/2") a uma profundidade de mais ou menos 3000 m., sendo isolados os 2200 m iniciais com revestimento de 24,45 cm e o restante, até o fundo do poço, não revestido e com diâmetro médio de 21,59 cm. O peso específico do fluido era de aproximadamente 1200 kg/m³ e a vazão de bombeio era de 88,58 m³/h. Eles calcularam as perdas de carga, para os 3000 m de poço, utilizando-se de fatores de fricção experimentais obtidos a 40°C. Chegaram a um valor de perda de carga parasita de 72,64 kg/cm², com o fluido inicial sem adição dos 4993 ppm de poliacrilamida hidrolisada. Também fizeram os cálculos usando o mesmo procedimento anterior, para o fluido contendo agora 4993 ppm e obtiveram um valor de 46,97 kg/cm² e, portanto, a queda na pressão foi de 25,67 kg/cm².

Posteriormente eles fizeram testes experimentais usando um fluido de perfuração salgado oriundo do campo. Então, realizaram os testes variando a concentração do polímero entre 713 e 7845 ppm, com adições cumulativas de 143 ppm. A cada adição eram realizadas leituras de diferencial de pressão a variadas vazões e feitas medidas reológicas. Os testes foram realizados a 40°C e 60°C respectivamente, no simulador hidráulico de superfície. Eles chegaram às seguintes conclusões[44]:

- Ocorreu o fenômeno de redução de arraste friccional, sendo o fenômeno função da temperatura de circulação do fluido. Além disso só foi constatado o fenômeno no regime de escoamento turbulento.
- Através de um gráfico fator de fricção versus número de Reynolds, usando os dados experimentais obtidos, eles mostraram que as correlações para fatores de fricção usadas assim como os gráficos relacionando apenas o número de Reynolds não permitem uma caracterização satisfatória desse fenômeno.

Embora tenham identificado o fenômeno, do ponto de vista qualitativo, eles sugeriram um estudo onde possa ser quantificado o fenômeno e que também sejam desenvolvidas correlações que se adequem ao fenômeno, para fluidos de perfuração salgados contendo poliacrilamida hidrolisada[44].

O presente trabalho visa obtenção de resultados quantitativos para o fenômeno assim como o desenvolvimento de correlações que descrevam o fenômeno, durante o escoamento de fluidos de perfuração, tanto em conduto tubular quanto anular, usando formulações de fluidos semelhantes às empregadas nas operações de perfuração. Além disso, como o fenômeno só ocorre basicamente no regime turbulento, segundo a literatura sobre o assunto, então tentou-se realizar os experimentos dentro deste regime.

Trabalhos semelhantes foram desenvolvidos por De Paula [15] e Maegava [41], respectivamente, embora ambos empregassem soluções poliméricas aquosas. Nesse trabalho serão usadas suspensões argilosas contendo concentrações de um polímero redutor de fricção. Os resultados esperados devem diferenciar dos obtidos com soluções aquosas ,pois as propriedades das suspensões argilosas atuam de algum modo nos resultados de forma a diferenciá-los dos obtidos com soluções aquosas poliméricas.

A obtenção de correlações vai ser muito importante do ponto de vista operacional pois vai fornecer subsídios mais realísticos e adequados para os cálculos hidráulicos importantes. Além disso, esse estudo vai ser o marco inicial para estudos posteriores na área de redução de

atrito em fluidos de perfuração. Num futuro próximo, as exigências na hidráulica de perfuração serão cada vez mais desafiadoras principalmente na perfuração em lâminas profundas, onde serão exigidas da tecnologia de fluidos de perfuração maiores participações na minimização das perdas de cargas que serão maiores e o domínio na área de redução de fricção talvez possa ser uma das soluções.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Redução de Fricção

2.1.1. Introdução

Quando um fluido se move relativamente à uma superfície sólida, uma força é exercida sobre esta, a qual denominamos de força de arraste. Vale salientar que esta apresenta a mesma direção do escoamento. A força de arraste, nesta condição, leva a uma dissipação ou degradação de energia. Muito se tem pesquisado no sentido de minimizar esse efeito[84].

A importância do controle dessas forças resulta num grande número de benefícios, dependendo da situação. Por exemplo, a redução do atrito fluido-tubulação reduz o consumo de energia de bombeio. O uso de melhores aerodinâmicas nos automóveis e aviões promovem uma redução no consumo de combustíveis nestes veículos. A melhoria da lubrificidade nos fluidos de perfuração levam a uma redução na energia de bombeio e assim por diante. Portanto, a minimização das forças de arraste levam a uma otimização no consumo energético e a uma economia dos recursos energéticos, atualmente em crescente esgotamento.

Pode-se separar as forças de arraste em dois grupos: fricção e pressão. As forças de arraste friccionais são devidas a tensões cisalhantes viscosas enquanto que as de arraste de pressão são devidas às forças normais[84].

Apesar de atualmente ser possível eliminar ou tornar mínimas as forças de arraste por pressão, o mesmo não pode se afirmar a respeito das forças de arraste friccionais. Inúmeras

técnicas para redução destas tem sido desenvolvidas sendo que a maioria atua na estabilização da condição laminar do escoamento. Entretanto, a descoberta de que adições de pequenas concentrações de certos aditivos ao fluido permitem modificações na estrutura da camada limite turbulenta e com isso reduções significativas das forças de fricção no fluido em regime turbulento, vem sendo uma arma a mais no combate a fricção durante o escoamento. Estes aditivos podem ser tanto partículas, fibras insolúveis, polímeros de longas cadeias lineares ou associações de sabões coloidais[84]. O presente trabalho vai focar o uso da poliacrilamida hidrolisada em suspensões argilosas, que é usado como fluido de perfuração na indústria de petróleo.

2.1.2. Histórico

A literatura apresenta uma série de exemplos de ocorrências de redução de arraste devido à contaminação de fluidos por substância. De 1883, tem-se registros de aumento da vazão em rios contaminados por concentrações anormais de lama siltítica [84]. Do fim do século passado, tem-se registros de ocorrências de redução de arraste em regime turbulento quando da execução de testes com protótipos de navios em Admiralty tank em Haslar. Neste último, foram observadas reduções de arraste de até 10%. Verificou-se que o contaminante, neste caso, era formado de pequenas concentrações de limo produzido por algas [28] [31].

No início deste século, Hele-Shaw [30] realizou o primeiro estudo experimental em redução de arraste devido à adição de pequenas concentrações de aditivos a um fluido. Estava interessado no entendimento do mecanismo de redução de fricção que ocorria durante o movimento dos animais na água do mar (atrito da pele do animal - água do mar). O sistema experimental era composto de cilindros concêntricos onde era injetada a substância redutora de arraste através de poros internos contidos no cilindro interno. A substância aditiva era o bflis animal que simulava o limo presente na água do mar. Embora o resultado visual indicasse a ocorrência do fenômeno, os testes foram inconclusivos.

Durante a II Guerra Mundial, necessitou-se estudar as características de escoamento da gasolina gelatinosa. Esse processo de gelatificação era obtido pelo tratamento da gasolina comum com napalm (complexo de sabões à base de alumínio). Para isso, foi enviado K. J. Mysels[50] e sua equipe à base militar de Edgenwood. O governo Americano financiava o projeto. Então, iniciou-se as medidas de queda de pressão por unidade de comprimento em tubos pequenos, usando-se a gasolina pura e aquela aditivada (gelificada)[50][84].

Observou-se, quando trabalhava-se com a gasolina aditivada em regime turbulento, que a queda de pressão por unidade de comprimento era muito menor que aquela obtida usando-se apenas o solvente (gasolina pura) para as mesmas condições de escoamento. Este fenômeno não foi divulgado imediatamente naquela ocasião por razões de estratégia militar. Quando foi publicada, anos depois, Mysels[50] e equipe atribuíram esse efeito à diferença de viscosidade entre a gasolina pura e aquela em estado gelificado. Mais tarde retificaram a explicação do fenômeno, admitindo que o fenômeno ocorria devido, provavelmente, à diferença no modo de escoar, entre a gasolina pura e a gelatinosa. O fenômeno da gasolina gelatinosa levou a posteriores experimentos realizados por outros pesquisadores.

Entretanto, foi o artigo de B. A. Tom [76] quem deu uma clara descrição científica do efeito que ficou chamado de "fenômeno de Tom". Tom[76] investigou o escoamento através de tubos do monoclóro benzeno aditivado com concentrações de polimetil metilacrilato. Neste estudo, Tom[76] usou apenas dois diâmetros. Com esse experimento, Tom[76] mostrou que:

- a redução de arraste ocorre apenas em escoamento turbulento;
- à medida que se diminui o diâmetro do tubo, aumenta-se a redução do arraste, mantendo-se fixa a concentração do aditivo e o número de Reynolds do escoamento;
- a redução de fricção ocorre apenas quando a tensão de cisalhamento nas paredes do tubo excede a um determinado valor crítico.

Tom[76] obteve redução de arraste de até 50% comparado com o solvente puro, usando uma concentração de aditivo de 0,25% em peso.

Em 1959, Shaver e Merrill [65] no MIT e Dodge e Metzner [16] em Delaware University, notaram que determinadas soluções não-newtonianas pareciam apresentar fatores de fricção anormalmente baixos comparados com a maioria das outras soluções. Segundo eles, soluções à base de carboximetil celulose (CMC) apresentaram esse comportamento. Inclusive Shaver e Merrill[65] mostraram, por meio de adições de corantes, que a elevadas vazões, estas soluções aparentemente reduziam o grau de turbulência.

Da mesma época, ocorrem registros de redução de fricção quando da injeção, sob altas pressões, de misturas de areia com soluções aquosas de determinadas gomas, durante operações de fraturamento. Estas soluções serviam para sustentação da areia a ser injetada na formação produtora fraturada. A goma guar, derivado natural de algumas plantas, foi a que apresentou maior incidência de redução de arraste. O fenômeno foi estudado por Pruitt, Crawford, Simons e Neil[58] que levaram os conhecimentos adquiridos para a marinha americana, visando possíveis aplicações militares.

Mais tarde, A. G. Fabula [22] identificou o espetacular potencial de redução de arraste do óxido de polietileno. Apenas pequenas concentrações desse produto são suficientes para obter-se apreciável redução de arraste. Por isso, esse produto tem se tornado o material padrão, juntamente com a poliácrilamida, nos estudos de redução da turbulência.

A partir daí, muitos trabalhos tem sido feitos visando um melhor entendimento do fenômeno.

2.1.3. Conceitos Básicos sobre Redução de Arraste Friccional

Pode-se definir redução de arraste friccional como qualquer modificação num sistema de fluido escoando em regime turbulento de modo que resulte num decréscimo na taxa usual de perda de energia de fricção, mantendo-se o sistema nesse regime. A partir dessa definição, pode-se excluir uma grande quantidade de aditivos que apenas atuam retardando a transição do fluido do regime laminar para o turbulento. Entretanto, deve-se ter ciência de que

atualmente existem técnicas de controle da camada limite tais como *boundary-layer heating* e *conflant wall coverings*. Entretanto, nesta revisão, só vão ser discutidas as técnicas de redução da fricção através de adições de substâncias que podem se solubilizar neste fluido ou que se mantenham em suspensões neste fluido e que provoca o fenômeno de redução de fricção.

Conforme mencionado anteriormente, o fenômeno de redução de fricção foi inicialmente demonstrado por Tom[76], através do escoamento de soluções poliméricas com aditivos através de tubos e em regime turbulento. Ele mostrou que era requerido consideravelmente menos energia por unidade de vazão que a requerida para bombear apenas o solvente. O fenômeno de Tom em regime turbulento tem sido amplamente confirmado.

Apesar de soluções poliméricas representarem a classe mais importante de redutores de fricção, vários pesquisadores desenvolveram trabalhos experimentais em redução de arraste com o uso de suspensões de partículas finas e fibras. Os resultados obtidos variaram, desde elevados índices de redução de arraste através do uso de fibras finas e flexíveis até resultados pouco satisfatórios através do uso de suspensões de areia e vários pós. Metzner e Vaseleski [46] mostraram que suspensões compostas de mais de um tipo de fibra poderia produzir reduções em torno de 25% a mais que se a essa mistura adicionassem baixa concentração de determinados polímeros.

Redução de arraste friccional em soluções poliméricas, tanto de escoamento interno como externo, depende da escolha correta do polímero redutor, da sua adequada concentração e da correta condição de escoamento. Polímeros que apresentaram boa performance de redução de arraste são aqueles cujas moléculas não são ramificadas, ou seja, apresentam uma forma molecular linear ou bem próxima da linearidade e também pesos moleculares maiores que 10^6 [25]. Como exemplo de polímeros solúveis em água que preenchem as condições acima podemos citar: óxido de polietileno, poliácridamidas, carboximetil celulose, etc. Todos eles são originalmente sintetizados. Além disso, existem polímeros naturais que preenchem as condições acima, tal como goma guar. Entretanto, os redutores naturais requerem maiores

concentrações que os sintéticos para se obter valores similares de redução de arraste. Finalmente, existe um grupo de polímeros que promove sensíveis reduções quando dissolvidos em solventes orgânicos[25].

A obtenção de concentrações otimizadas envolve a combinação adequada de um conjunto de parâmetros chaves. Então, a obtenção da máxima redução de arraste pode ser conseguida utilizando-se tubulações de diâmetro muito pequeno em associação com 10 ppm em peso de óxido de polietileno de $M_v = 5.10^6$, enquanto que 100 ppm do mesmo produto são necessários para obtenção de igual resultado em tubulações de diâmetros maiores. Por outro lado, goma guar é normalmente usada em concentrações que variam entre 1000 e 5000 ppm[25].

R. C. Little [38] mostrou que soluções de sabões complexos dão muito bons percentuais de redução de arraste em soluções não aquosas. Diferente de muitas soluções poliméricas, estes sabões apresentaram um índice de degradação mecânica muito baixa em relação àqueles poliméricos, sendo, portanto, indicados para aplicações onde não seja exigida solução aquosa.

2.1.4. Escoamento Turbulento em Tubos

Uma das formas de se ter uma visão quantitativa do fenômeno de redução de arraste friccional é através de gráficos fator de fricção versus Re (gráfico de Moody) ou $1/\sqrt{f}$ versus $Re\sqrt{f}$ (gráfico da coordenada de Prandtl).

A figura 2.1 mostra um diagrama de Moody para um hipotético escoamento tubular e turbulento de um fluido onde ocorre o fenômeno de redução de arraste. Pode-se perceber que nenhuma diferença ocorre entre o comportamento do fluido e do solvente dentro da região laminar. Da mesma forma para a região de transição. Entretanto, avançando-se pela região turbulenta, chegou-se no ponto A da figura, onde inicia-se o fenômeno de redução de arraste friccional. A partir do ponto da tensão cisalhante crítica, seguindo através da região turbulenta, observa-se um crescente afastamento dos valores dos fatores de fricção do fluido

em relação aos obtidos a partir da relação de Von Karman - Prandtl (para tubos lisos). Eventualmente, os valores de f alcançam uma linha menor, ou assíntota, em B que é seguida por todos os posteriores valores de números de Reynolds. A região, no gráfico, entre A e B é conhecida como zona "polimérica". Esta área é de principal interesse nas aplicações industriais. Antes de B temos a assíntota de máxima redução de fricção e foi reconhecida inicialmente por Virk [77] que também a determinou para a faixa de números de Reynold entre 3000 e 140.000[63].

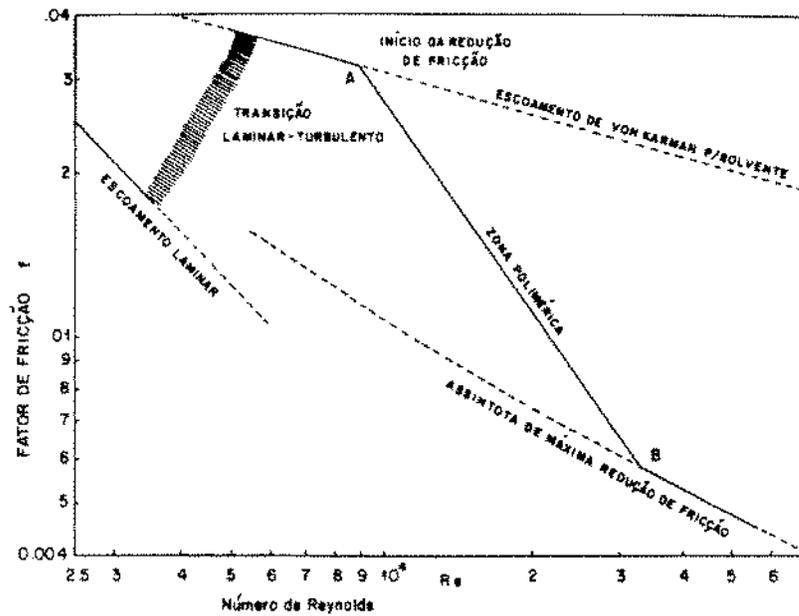


Figura 2.1 - f versus Re para o escoamento de uma solução polimérica, através de um tubo liso (fonte: Journal of Hydraulic Research vol.20(1),1982)

A figura 2.1 mostra uma situação para tubo liso. Entretanto, se este fosse rugoso, mantendo as condições de escoamento, a curva turbulenta seria mais acima daquela para tubo liso, no diagrama, dependendo do grau de rugosidade do tubo e do número de Reynolds. Após o ponto da tensão cisalhante crítica, a curva de redução de fricção seria movida para cima, razoavelmente [63].

A redução de arraste por fricção produzida por polímeros solúveis de alto peso molecular depende do tipo de polímero, concentração deste, diâmetro do tubo e do número de Reynolds. O tipo de polímero está relacionado com a espécie química, distribuição do peso molecular presente e também de fatores intangíveis tais como as condições físicas do produto (se este se encontra deteriorado, degradado, etc). Devido a essa série de fatores torna-se difícil

predizer seu comportamento em uma específica atuação. Um meio de contornar essa situação é através do uso de comparações de dados obtidos a partir de tubos de diferentes diâmetros com soluções poliméricas idênticas[63].

Autores diversos desenvolveram expressões para quantificar o percentual de arraste, devido à presença de redutores nos fluidos (solventes) em escoamento. Entretanto, a maior parte destas levam ao mesmo resultado; na realidade, a diferença entre elas está apenas nas variáveis usadas nos cálculos. Virk, Mickley e Smith [79] quantificaram a redução de fricção através da relação:

$$\% R = \left[1 - \frac{\tau_{WF}}{\tau_{WS}} \right] \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde:

- τ_{WF} = tensão cisalhante de parede, para o solvente contendo o redutor de fricção,
- τ_{WS} = tensão cisalhante de parede, para o solvente

Por outro lado, Savins [60] expressou a redução de fricção através de:

$$\% R = \left[1 - \frac{\Delta J_P}{\Delta J_S} \right] \cdot 100 \quad (2.2)$$

onde:

- ΔJ_P = queda de pressão no solvente contendo o redutor de fricção,
- ΔP_S = queda de pressão no solvente puro, e
- As quedas de pressão foram obtidas às mesmas pseudo-taxas de deformação.

Burger, Chorn e Perkins[12] desenvolveram a expressão abaixo, usando diferencial de pressão:

$$\% R = \left[1 - \frac{\Delta P_P}{\Delta P_F} \right] \cdot 100 \quad (2.3)$$

onde:

• ΔP_p = queda de pressão para o solvente puro,

• ΔP_p = queda de pressão para o solvente contendo o redutor de fricção.

Embora parecidas, as expressões de Savins[60] e Burger et alii[12] se diferenciam nos valores do diferencial de pressão, pois na expressão (2.2) estes valores são medidos às mesmas pseudo-taxas de cisalhamento, enquanto na (2.3) são medidos à mesma vazão volumétrica.

Finalmente, Ting e Kim citado por [75] exprimiram o percentual de redução de arraste em função dos fatores de fricção, conforme abaixo:

$$\%R = \left[1 - \frac{f_p}{f_s} \right] \cdot 100 \quad (2.4)$$

onde:

• f_p = fator de fricção do solvente contendo o redutor de fricção,

• f_s = fator de fricção do solvente puro.

À medida que cresce o afastamento da linha AB (da solução) daquela do escoamento do solvente (fig. 2.1), com o aumento do número de Reynolds, observa-se que o percentual também aumenta. Para soluções poliméricas aquosas os valores típicos de %R giram entre 60 e 80%.

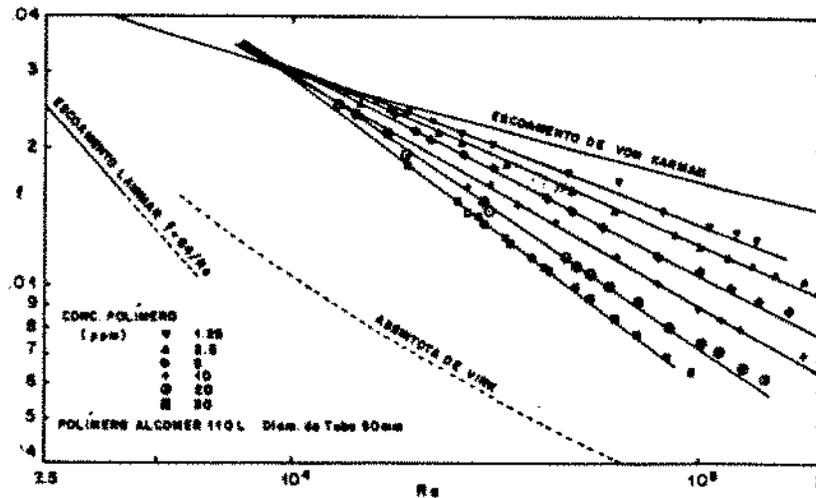


Figura 2.2 - Efeito da concentração do polímero redutor de fricção no escoamento de uma solução polimérica aquosa (fonte: Journal of Hydraulic Research, vol. 20(1), 1982)

A adição, mesmo pequena, de um bom redutor de fricção a um solvente causa significantes reduções de fricção. A figura 2.2 mostra resultados calculados a partir de dados obtidos com tubos de 50 mm e soluções aquosas de poliacrilamida, onde variou-se a concentração entre 1 e 40 ppm em peso. Embora outros polímeros tenham maiores percentuais de redução da fricção, os dados apresentados aqui [23] foram selecionados devido a estes mostrarem claramente o efeito da concentração de um polímero na zona polimérica.

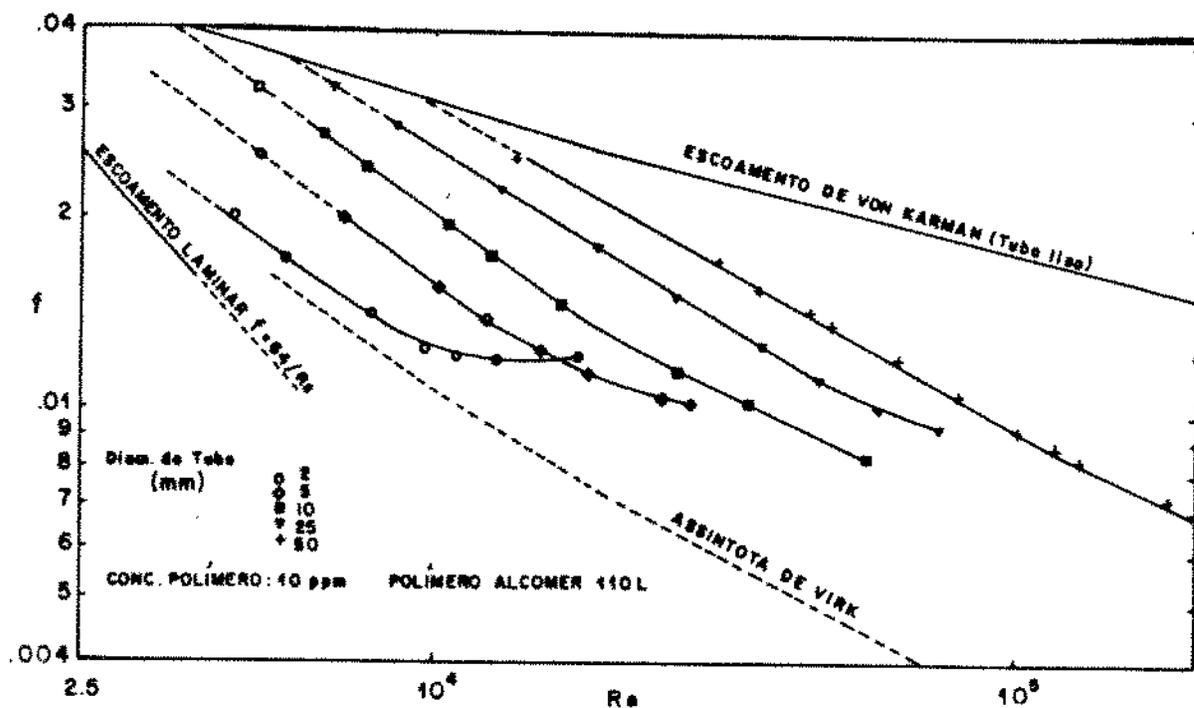


Figura 2.3 - Efeito do diâmetro do tubo no escoamento de uma solução aquosa com polímero redutor de fricção (fonte: Journal of Hydraulic Research, vol.20(1),1982)

O efeito do diâmetro do tubo é mostrado na figura 2.3. Foram obtidos dados para 5 diferentes diâmetros de tubos (2, 5, 10, 25 e 50 mm) e usou-se uma concentração de 10 ppm do redutor de fricção Alcomer110L™. Observou-se que com os dados obtidos com diâmetros de 10 mm e maiores conseguia-se um decrescimento nos fatores de fricção, a partir do ponto de tensão cisalhante crítica, à medida que aumentava-se o número de Reynolds. Por outro lado, os dados obtidos com os tubos de 2 e 5 mm tiveram um comportamento peculiar, ou seja, observou-se um comportamento de crescimento nos fatores de fricção à elevados valores de número de Reynolds e conseqüentemente à tensões cisalhantes altas (vide figura 2.3). Com

isso, sugerindo que as tensões de cisalhamento de paredes elevadas promoviam uma degradação nos polímeros redutores de fricção. Sendo este tipo de degradação é mais acentuada em tubos de pequenos diâmetros porque obtém-se muito maiores tensões de cisalhamento de parede para uma dada vazão comparativamente aos tubos de diâmetros maiores.

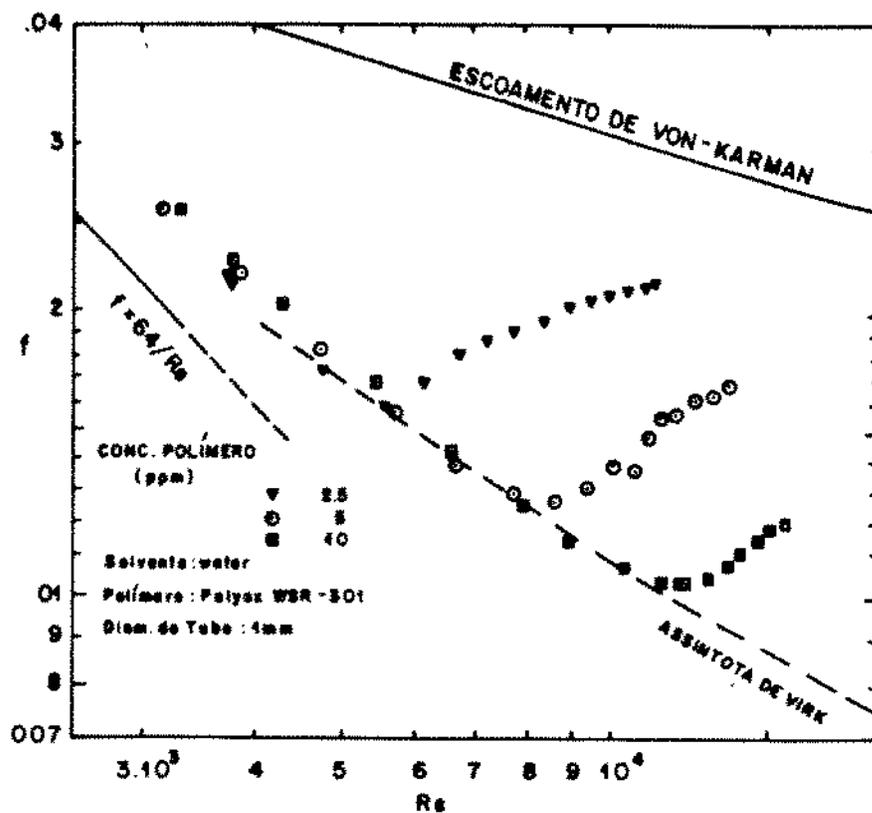


Figura 2.4 - Degradação mecânica ocorrida no escoamento de uma solução aquosa com polímero redutor de fricção à medida que eleva-se o Re e mantém-se a concentração fixa, num tubo de diâmetro reduzido (fonte: Journal of Hydraulic Research, vol.20(1),1982)

A figura 2.4 foi obtida com dados do escoamento turbulento de soluções aquosas de Poliox WSR-301™ nas concentrações de 2,5, 5 e 10 ppm em tubos de 1 mm [35]. Pela figura 2.4 nota-se que a parte da curva de baixos números de Reynolds tende a se ajustar à assíntota

de máxima redução de fricção de Virk. É visto também que, à medida que eleva-se o número de Reynolds, ocorre (para cada concentração) uma abrupta elevação dos fatores de fricção evidenciando claramente o tipo de degradação anteriormente mencionado. Além disso, quanto maior a concentração do polímero, aparentemente maior a resistência da solução a velocidade de cisalhamento.

Apesar de ser possível deduzir a influência da concentração no fenômeno de redução de fricção através do gráfico 2.1, tem-se uma melhor visão quantitativa da influência com o gráfico 2.5. Para cada curva fixou-se o número de Reynolds e variou-se a concentração, obtendo-se uma curva de variação do fator de fricção com a concentração. Observa-se que a máxima redução de fricção ocorre a uma concentração de 20 ppm de polímero para todas as curvas. Concentrações acima de 20 ppm não produzem nenhum efeito (vide gráfico), uma vez que foi alcançado o patamar máximo de redução de arraste.

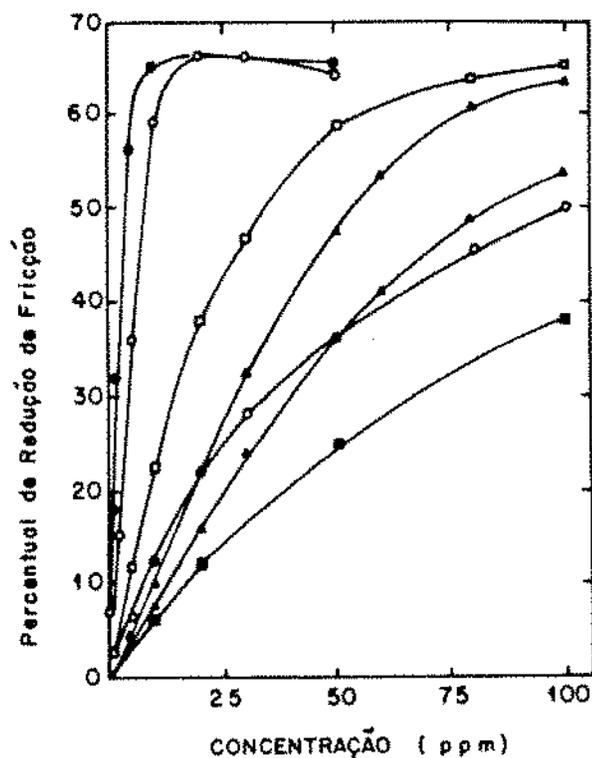


Figura 2.5 - Variação de %R com a concentração do polímero redutor de arraste, para Re fixo (fonte: Journal of Hydraulics Research, vol.20(1), 1982)

2.1.5. Máxima Redução de Arraste Friccional

Encontrou-se experimentalmente [27][29] que a redução de arraste friccional, para dado número de Reynolds, alcança seu máximo para cada conjunto de condições, tais como tipo e concentração do polímero redutor de fricção e diâmetro do tubo. A redução de fricção máxima obtida é em média de 80% daquela que se poderia alcançar (teoricamente) se o escoamento fosse completamente laminar. Baseando-se em vários dados experimentais Virk et al. [79] propuseram a seguinte equação para a assíntota de máxima redução de arraste friccional:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 32.4 \quad (2.5)$$

Na figura 2.4, essa assíntota aparece, juntamente com a curva de Prandtl-Karman para fluidos newtonianos.

2.1.6. Polímeros

De modo a melhorar o entendimento do fenômeno de redução do arraste friccional em fluidos contendo polímeros como aditivos redutores de fricção, é necessário um entendimento do conceito de macro moléculas ou polímeros. Na realidade, polímeros ou macro moléculas são termos usados para expressar o mesmo tipo de substância química. Logo, polímeros são produtos químicos compostos de repetitivas pequenas unidades conhecidas como monômeros. Estes formam macro moléculas que são unidas entre si por ligações químicas do tipo covalente. Em alguns casos, a repetição desses monômeros tem a forma linear, ou seja, formam longas cadeias lineares. Em outros casos, as cadeias são ramificadas ou interconectadas para formar cadeias tridimensionais. As ramificações ocorrem aleatoriamente ao longo da cadeia principal para um típico polímero ramificador[3].

O número de unidades estruturais na cadeia é chamado de grau de polimerização. A macro molécula do óxido de polietileno é um bom exemplo de um polímero linear e é representado conforme figura 2.6[3].

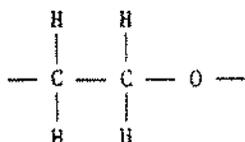


Figura 2.6 - Cadeia linear

A unidade de repetição, neste caso, é o C₂H₄O que é montada linearmente. Além disso, a figura 2.7 mostra uma estrutura ramificada[3].

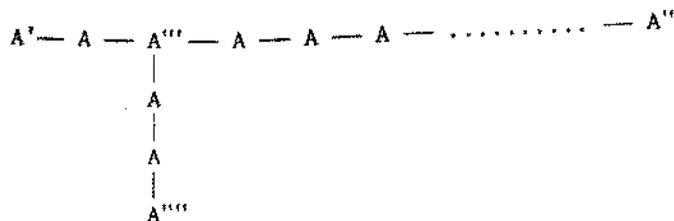


Figura 2.7 - Cadeia ramificada

Um outro termo encontrado na tecnologia dos polímeros é o copolímero. Este está relacionado a polimerização de dois ou mais tipos diferentes de monômeros numa mesma cadeia, como na figura 2.8, sendo uma seqüência aleatória de tipos de monômeros[18].



Figura 2.8 - Cadeia de um copolímero

Se a seqüência fosse regular, as unidades repetidas poderiam ser agrupadas juntas de modo que poderia-se classificar a estrutura como de polímero linear ou ramificado[3].

Como o conceito chave, no escoamento turbulento de soluções poliméricas, é o de que moléculas poliméricas (dos redutores de fricção) interferem fisicamente no desenvolvimento

das perturbações hidrodinâmicas, então, é importante saber determinar o tamanho médio das moléculas. Este tamanho corresponde à distância entre os dois extremos da cadeia polimérica, teoricamente. Na prática, o comprimento de um determinado polímero é obtido pela raiz quadrática da média dos comprimentos ao quadrado das cadeias poliméricas, incluindo todas as suas possíveis configurações. E essa grandeza é representada por h_M . Se a cadeia polimérica for representada por uma série de N ligações atômicas de comprimento L e, se os átomos puderem formar ângulos entre si, então:[3]

$$h_M^2 = NL^2 \quad (2.6)$$

Na realidade, os átomos são agrupados por ligações químicas que apresentam uma determinada relação angular. Para este tipo de cadeia, o comprimento completamente estendido, h_{EX} pode ser calculado por:[63]

$$h_{EX} = \sqrt{\frac{2}{3}}NL \quad (2.7)$$

Maiores complicações no cálculo do comprimento médio das moléculas dos polímeros em soluções surgem devido às interações entre os componentes desta cadeia. Em geral, estes cálculos não são realizados facilmente. Para contornar as dificuldades, recorre-se a modelos semi-empíricos, como:

$$h^2 = N\beta^2 \quad (2.8)$$

Onde β representa uma constante que é específica para cada polímero. Essencialmente, β representa um comprimento "ideal" que é maior que o comprimento médio verdadeiro. Para polímeros orgânicos, β é aproximadamente $3L$. A taxa β/L é, portanto, uma medida da consistência da cadeia de um polímero, e quanto maior for esta taxa, mais extensa e rígida será a cadeia. O fator β pode ser obtido a partir de medidas experimentais[63].

Bons solventes são aqueles onde existe grande afinidade (atração) entre os componentes do polímero e as moléculas do solvente, enquanto um solvente fraco é aquele onde existe pouca afinidade entre polímeros e solvente. O parâmetro α foi criado para levar em conta:

- o efeito da afinidade entre polímero e solvente nas dimensões da cadeia polimérica
- a possibilidade de que porções de moléculas poliméricas interfiram fisicamente em outras, em diferentes solventes.

Então teremos,

$$h^2 = N\alpha^2\beta^2 \quad (2.9)$$

Um solvente que apresente $\alpha=1$ para um dado polímero é chamado um solvente θ ou solvente ideal[63].

O peso molecular também é importante para caracterizar um polímero. Embora, na caracterização de determinados polímeros seja usado um único valor de peso molecular, na realidade essa grandeza existe como uma distribuição de pesos moleculares em torno de um valor médio (polidispersividade). A imperfeição na homogeneização durante o processo de polimerização ou deficiências de manuseio mecânico durante a preparação ou extração de material normalmente provocam variações nos comprimentos das cadeias, ou seja, produzem-se polímeros de comprimentos variados tanto menores quanto maiores que o comprimento teórico dessas cadeias. Embora a variação nos pesos moleculares de uma dada amostra de polímero possa ser grande, o mesmo não ocorre quando emprega-se a técnica do fracionamento, ou seja, a polidispersividade fica bastante reduzida quando não usa-se essa técnica[63].

Mesmo as melhores distribuições, obtidas pela técnica de fracionamento, podem apresentar uma variação no peso molecular entre 10.000 a 20.000 em uma amostra de polímero que possui peso molecular médio de 500.000[34].

Tem sido encontrado, experimentalmente, que o efeito da redução de fricção manifesta-se quando as seguintes condições prevalecem:

- quando são usados polímeros com peso molecular médio de 500.000 ou mais,
- o polímero é linear,

- o polímero é solúvel no solvente.

Quando todas as condições acima são satisfeitas, reduções de fricção de 70% ou mais são obtidas.

Tem-se trabalhado com uma variedade de polímeros de variadas composições químicas, entretanto, não se observou nenhum significado especial na química envolvida, exceto o caráter iônico. Daí suspensões com fibras inertes (que não interagem com o fluido sustentador), apresentarem propriedades redutoras de fricção em escoamento turbulento. Portanto, a configuração química parece ter importância secundária em relação à condição de linearidade da estrutura polimérica. Entretanto, o porquê da ocorrência do fenômeno, quando a molécula polimérica é linear e de elevado peso molecular e da não ocorrência da redução quando a molécula polimérica é ramificada muito embora apresente peso molecular elevado, não foi esclarecida[63].

2.1.7. Degradação de Polímeros

A perda da eficiência dos polímeros redutores de fricção é denominada de envelhecimento ou degradação. O envelhecimento é mais indicado para aquela perda de eficiência devida às alterações físico-químicas ocorridas no produto durante a sua estocagem. Soluções poliméricas diluídas armazenadas em ambiente luminoso sofrerá o processo de envelhecimento após alguns dias, embora o produto armazenado em ambiente escuro normalmente pode durar anos antes da ocorrência deste processo de envelhecimento[63].

Por outro lado, o termo degradação é usado para a perda de eficiência do polímero resultante da ação de energia mecânica. Por exemplo, pode ocorrer esse processo quando passa-se a solução através de bombas, tubos ou ambos. Este fenômeno é de relevante importância porque a degradação mecânica de polímeros de alto peso molecular em solução aquosa diluída é o principal obstáculo em aplicações de engenharia. A degradação tem sido relacionada com as tensões de cisalhamento. Existem algumas evidências de que estas tensões

são responsáveis pela degradação em soluções diluídas à base de óxido de polietileno. Verifica-se que em escoamentos onde as moléculas solubilizadas no solvente são submetidas a esforços de alongação, ocorre degradação. Sabe-se agora, que este tipo de escoamento causa estiramento e alinhamento das moléculas do polímero que, em casos extremos, pode levar a seu rompimento ou do aglomerado molecular[81]. Slanec [71] demonstrou que a forma das entradas dos tubos causam degradação e existem evidências que mesmo reduções suaves no diâmetro do tubo pode resultar em moderada degradação.

Cada polímero tem seu específico grau de degradação. Por exemplo, embora a poliacrilamida seja um dos melhores agentes redutores de fricção, é bastante afetada pelo processo de degradação. Para um determinado polímero, quanto menor o peso molecular médio obtido, menos este é afetado pela degradação. Entretanto, os custos de fabricação envolvidos podem chegar a elevar o preço do produto em dez vezes. Portanto, a literatura sobre o assunto recomenda achar-se os limites de degradação do polímero redutor e ajustar as aplicações de engenharia a esses limites, dentro do possível[63].

Não há dúvida de que a maioria das degradações sofridas por um polímero ocorre num ambiente de intenso cisalhamento, semelhante à turbulência ocorrida num impelidor de uma bomba centrífuga. Polímeros que apresentam uma grande tendência a degradar-se duram pouco em aplicações envolvendo o uso de bombas centrífugas e tubos rugosos. Entretanto, esses mesmos polímeros suportam satisfatoriamente aplicações onde usam bombas de deslocamento positivo e, em experimentos, recomenda-se o seu uso em vez das bombas centrífugas[63].

Tem-se tentado mostrar experimentalmente a relação entre a degradação e o esforço mecânico sobre a solução polimérica. Esses experimentos, normalmente, são realizados a altas taxas de cisalhamento. Polímeros solúveis em fluidos orgânicos têm sido escolhidos. Isto porque eles podem ser produzidos com uma distribuição molecular estreita e também facilitam a análise da distribuição de peso molecular através do processo de cromatografia. Yu, Zakin e Patterson citado por[84] estudaram amostras de polisobutano e poliestireno a alta

taxa de cisalhamento em um viscosímetro de cilindros concêntricos. Usaram tensões de cisalhamentos de até 10.000 Nm^{-2} para uma correspondente taxa de cisalhamento de 3 m/s e chegaram a conclusão de que a taxa de cisalhamento de 1 m/s é suficiente para o estudo de degradação em sua faixa de peso molecular.

Patterson e Abernathy [54] estudaram o processo de degradação em escoamento tubular turbulento, usando uma solução aquosa de óxido de polietileno. Usando tubos de 1,74 cm e 0,63 mm de diâmetro, respectivamente, observaram pouca degradação do polímero para uma taxa de cisalhamento de 0,050 m/s, embora para uma taxa de cisalhamento de 0,140 m/s iniciou-se o processo de degradação.

O estudo de Ollis [52] relacionou diâmetro do tubo, taxa de cisalhamento e redução de fricção. Os resultados foram obtidos usando-se uma solução aquosa de 10 ppm em peso de WSR-30™, figura 2.9, Para os tubos menores, 1 e 2 mm, os dados indicaram uma alta taxa de degradação. da redução começassem a diminuir. Por outro lado, com os tubos de 2,5 e 5,0 cm ocorreu um patamar máximo em torno de 70% de redução de fricção. Observou-se que mesmo a valores altos da taxa de cisalhamento, os valores de redução de fricção caíram lentamente, sendo este efeito atribuído ao grande tamanho da área de escoamento nos tubos de diâmetros maiores, que com isso permite uma reserva de polímeros de suficientemente elevado peso molecular ainda não degradado pelo cisalhamento quando em escoamento. Apesar de muitos estudos verificarem o processo de degradação no escoamento turbulento em tubo, com soluções poliméricas, o mecanismo não é completamente entendido.

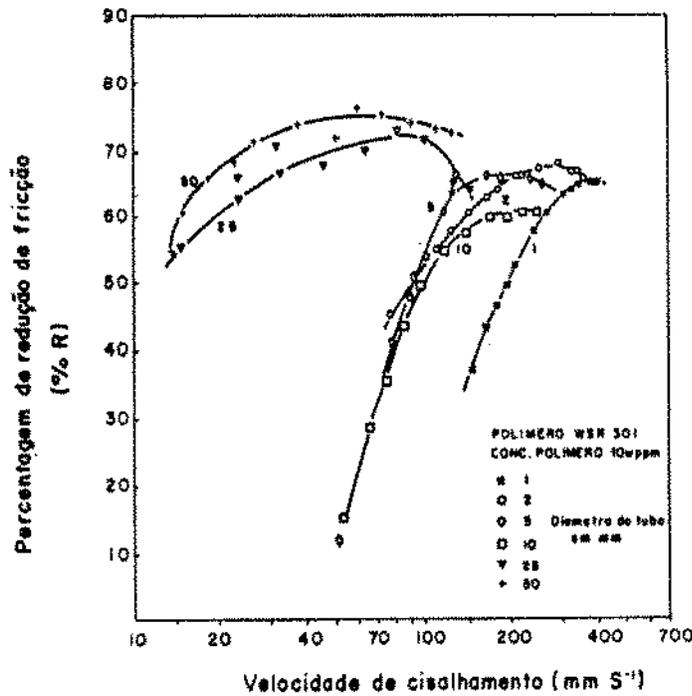


Figura 2.9 - Influência do diâmetro do tubo na degradação mecânica do polímero redutor de fricção, numa solução aquosa (fonte: Journal of Hydraulic Research, vol.20(1),1982)

2.1.8. Influência da Rugosidade na Redução do Arraste Friccional

A maioria dos experimentos sobre o estudo de redução de arraste, utilizam tubos com paredes mais lisas que aqueles usados na prática pela indústria. O efeito da rugosidade na redução de arraste, principalmente a polimérica, tem atraído atenção de alguns pesquisadores. Hoyt e Fabula [32] foram os primeiros a demonstrar que os polímeros redutores de fricção eram efetivos em superfícies rugosas também. White [83] realizou testes com tubos rugosos escoando soluções de Polyox WSR-301™ e goma guar. Ele empregou tubos bastante rugosos. O interessante é que uma solução de 480 ppm em peso de goma guar, que produzia até 60% de redução de fricção num escoamento em tubo liso de 0,012 m, não produzia nenhuma redução do arraste em tubos rugosos para o mesmo conjunto de parâmetros (concentração de polímero, vazões, diâmetro do tubo, etc). Entretanto, o acréscimo de mais 5 ppm à concentração anterior mostrou a ocorrência de redução de arraste em tubos rugosos [77][64].

Virk [64] mostrou que a tensão cisalhante crítica de redução de fricção em tubos rugosos é a mesma que se obtém quando se usa tubos lisos. Seus dados também mostraram que a

máxima redução de fricção conseguida em tubo rugoso é limitada pela mesma assíntota para tubo liso.

Dados oriundos de Brandt et al citado por [84] usando carboximetil celulose (CMC), Spangler citado por[84] usando poliacrilamida e Virk, McNally e White, Debuile e Sobersky citado por[84] usando soluções de polyox, mostraram o fenômeno de redução de arraste friccional em tubos rugosos. Um tubo pode ser considerado hidraulicamente liso se a altura dos seus elementos de rugosidade é menor que a espessura da camada viscosa (camada limite). Por outro lado, será rugoso se as rugosidades se projetam para dentro da região turbulenta. Entretanto, existe uma região de transição entre esses dois extremos, onde a rugosidade se situa dentro da camada intermediária da camada limite turbulenta. Como se sabe, os polímeros redutores de fricção alteram a forma e a espessura da camada limite de transição (escoamento turbulento). Conseqüentemente, um tubo que se comporta hidraulicamente como rugoso para um determinado fluido pode se comportar como liso para uma solução contendo redutores de fricção se a espessura da camada de transição (camada limite de transição) for muito elevada pela ação do polímero.

Hoyt e Fabula[32] mostraram que para a moderada rugosidade, encontrada nos tubos comerciais, o fenômeno de redução de fricção é pouco influenciado por esse fator, uma vez que os efeitos da rugosidade sobre este fenômeno só ocorreram em situações experimentais de extremos valores de rugosidade.

2.2. Perfis de Velocidades Durante o Escoamento de Fluidos com Redução de Arraste

2.2.1. Em Tubos:

Os perfis de velocidades de fluidos com redução de fricção em fluxo turbulento seguem as mesmas linhas daqueles para fluido newtoniano. Divide-se as secções tubulares em duas

regiões: aquela propriamente turbulenta, onde os efeitos inerciais são predominantes, e aquela nas proximidades da parede do tubo, onde as propriedades constitutivas do fluido assumem papel importante. A região laminar, numa secção tubular, se estende ao longo da fina camada laminar ($0 < y_{laminar} < y_L$ laminar, sendo $y=0$ a parede do tubo), enquanto que a região turbulenta compreende y_L (final da camada laminar) até $y=R$ (raio do tubo). Então as velocidades médias na região da parede podem ser expressas conforme abaixo:

$$\text{Na zona laminar: } \bar{u} = f_1(\rho, \tau_w, \mu, \lambda, y)$$

$$\text{Na região turbulenta: } \bar{u}_{max} - \bar{u} = f_2(R, \rho, \tau_w, y) [10]$$

Seyer e Metzner[64] usando análise dimensional, chegaram a:

$$u^* = \frac{\bar{u}}{u^*} = f(R^*, \gamma, De) \quad (2.10)$$

onde:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \text{ (velocidade de fricção)}$$

$$R^* = Ru^* / \nu \text{ (número de Reynolds usando velocidade friccional e o raio)}$$

$$\gamma = \frac{y}{R}$$

De = número de Deborah

Muitas expressões foram desenvolvidas por estudiosos do fenômeno de redução de arraste friccional, havendo divergência nos resultados obtidos por eles na região turbulenta, mas concordância na região laminar do escoamento, ou seja, $y^* = u^*$ para $y \leq y_{laminar}$ [16]

Virk [77], [78] desenvolveu um perfil de velocidade baseado no conceito de subcamada elástica. Segundo o pesquisador, a estimulação das moléculas poliméricas pelo cisalhamento turbulento gera um zona, a qual denominamos subcamada elástica, característica do fenômeno de redução de arraste friccional. Esta camada elástica é gerada no tensão cisalhante crítica de redução de arraste e cresce com o aumento do fenômeno de redução de fricção até ocupar inteiramente a secção do tubo, no caso de máxima redução de fricção. Este perfil de velocidade durante a ocorrência de redução de arraste apresenta duas situações extremas. A

baixa redução de fricção para escoamento na camada mais externa da camada limite, $y^+ \geq 50$, o perfil é elevado para cima de uma quantidade δ^+ paralelamente àquele newtoniano, sendo δ^+ definido como Split efetivo. No segundo caso, quando ocorre a redução de arraste máximo, o perfil de velocidade apresenta a forma semi logarítmica (similar ao perfil turbulento newtoniano) exceto que a constante de comprimento de mistura passa a ser 0.085 enquanto para o perfil newtoniano é igual a 0,4. Virk[77] propôs, então, as relações:

$$u^+ = 11,7 \ln y^+ - 17,0 \quad \text{para} \quad y_L^+ \leq y^+ \leq y_E^+ \quad (2.11)$$

sendo y_L^+ a espessura da camada laminar e y_E^+ a da subcamada elástica.

Um grande número de tentativas têm sido feitas para medir experimentalmente o perfil da velocidade durante um escoamento turbulento onde ocorre o fenômeno de redução de arraste. As primeiras medidas do perfil de velocidade foram realizadas usando-se tubos de impacto neutro e foram obtidos resultados errados devido aos efeitos viscoelásticos do fluido (através das forças normais) que levaram a menores valores de velocidades médias quanto integradas sobre a área do tubo. A magnitude dos erros era função da magnitude das forças viscoelásticas normais e conseqüentemente do tipo, concentração e peso molecular do aditivo redutor de fricção. Ernst [19] e Wells [82] obtiveram erros menores que 7% enquanto que valores obtidos por Pruitt, Crawford, Simons e Neil [58] apresentaram erros tão elevados que foram obtidos valores de velocidades negativos próximos às paredes do tubo. Astarita e Nicodemo [1] obtiveram valores de velocidades com erros em torno de 29% usando tubo de Pitot. Portanto, não se recomenda o uso de tubos de impacto nas medidas de perfis de velocidade quanto temos escoamento tubular turbulento com ocorrência de redução de arraste friccional devido à adição de redutores de atrito. Nesta situação, as forças visco-elásticas normais variam com a taxa de cisalhamento da parede e também com o raio do tubo. Outras técnicas têm sido usadas para efetuar as medidas de perfis de velocidades em escoamento, onde ocorre o fenômeno de redução de fricção, tais como uso de anemometria com lâmina aquecida e a técnica do traçador de bolha de gás.

Na técnica de anemometria de lâmina quente, a taxa de transferência de calor da lâmina aquecida para o fluido depende basicamente da velocidade deste fluido. Quando emprega-se essa técnica na determinação do perfil de velocidade, conforme condição anteriormente mencionada, deve-se especificar uma correlação entre a velocidade e a taxa de transferência de calor. Patterson e Florez [55], usando essa técnica, obtiveram os perfis de velocidade durante a ocorrência do fenômeno de redução de fricção para soluções contendo polímeros visco-elásticos e sabões. Eles observaram uma forte tendência de engrossamento da camada limite viscosa a baixas concentrações, também observada por Ernst [19], Wells [82] e Elata e Tirosh [18]. Em concentrações mais elevadas de polímeros, essa tendência foi ainda maior. Por outro lado, em soluções com sabões, o perfil apresentou um comportamento diferente daquele com soluções poliméricas. Não se observou nenhuma tendência de engrossamento da camada limite viscosa. As razões para esse fato está no mecanismo de redução de fricção, pois o mecanismo redutor de fricção em sistemas coloidais são diferentes daqueles de soluções poliméricas.

Seyer e Metzner [64] obtiveram perfis de velocidade usando a técnica de traçador com bolhas de gás. O erro experimental com essa técnica foi menor que 3%.

Da explanação acima sobre medidas experimentais de perfis de velocidade com fluidos sujeitos a redução de fricção, pode-se sentir o quanto é difícil a sua obtenção experimental.

2.2.2. Anular entre Tubos

Shenoy e Shintre [67] desenvolveram relações para escoamento anular turbulento com ocorrência do fenômeno de redução de arraste friccional. Em consequência da presença de duas "paredes" no ânulo entre tubos, estes dividiram a região anular em duas, uma interna e outra externa. Em consequência disso, cada uma dessas regiões apresentou seu próprio perfil de velocidade. Além disso, admitiram que o efeito do cilindro interno (tubo interno) sobre o perfil da velocidade da região externa (região próxima às paredes internas do tubo externo) era

muito pequeno e portanto podia ser desprezado. Então, a expressão para o perfil de velocidade para tubos de paredes lisas pode ser da forma (para região externa):

$$u^+ = A_1 y_0^{+B_1} \quad (2.12)$$

Definições de A_1 e B_1 são:

$$A_1 = \frac{2^{(1+\beta)/(2-\beta)} [(4-\beta)]}{\alpha^{1/(2-\beta)} [(2-\beta)]^2}, \quad (2.13)$$

$$B_1 = \frac{\beta}{2-\beta}$$

Onde α e β são funções de De (número de Deborah) e Shenoy e Shintre[79] apresentaram valores para esses parâmetros, de acordo com o número de Deborah. Agora, para a região mais interna do escoamento anular, eles desenvolveram a expressão para o perfil de velocidade conforme abaixo:

$$u_i^+ = A_1 \left[\frac{K(1-\lambda^2)}{\lambda^2 - K^2} \right]^{(B_1+1)/2} \left[\frac{1-\lambda}{\lambda-K} \right] y_i^{+B_1} \quad (2.14)$$

Tal que $\lambda_1 = \frac{r_m}{r_0}$ e $\lambda_2 = \frac{r_i}{r_0}$ sendo r_i , r_0 e r_m representações do raio do tubo interno, do tubo externo e o raio da velocidade máxima, respectivamente.

Os resultados acima definem completamente o perfil de velocidade anular para um fluido em escoamento turbulento no qual ocorre redução de arraste friccional (soluções poliméricas diluídas, etc). Vale também frisar que essas relações são teóricas, faltando resultados experimentais para comparação. E no presente, a literatura sobre redução de arraste em escoamento anular turbulento só dispõem desse trabalho[67] para perfil de velocidade.

2.3. Reologia

Equações derivadas das leis da conservação não contêm qualquer informação sobre as propriedades mecânicas dos fluidos. Muitas propriedades mecânicas dos fluidos são descritas por equações que relacionam tensor tensão local com parâmetros cinemáticos locais. Portanto, equações que realizam esse papel são denominadas equações constitutivas reológicas.

Um dos mais importantes parâmetros cinemáticos que surge numa equação constitutiva é o tensor taxa de deformação, que pode ser definido como[10]:

$$\underline{e} = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T] \quad (2.15)$$

Ou

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.16)$$

Um bom critério para a classificação de fluidos é através da forma das suas equações constitutivas. Assim, para os fluidos newtonianos a relação entre \underline{e} e \underline{T} (e tensor tensão) é linear, enquanto para fluidos mais complexos, tais como soluções poliméricas, a relação entre os tensores \underline{e} e \underline{T} é não linear. Além disso, esses fluidos, também dependem de outras variáveis, como o histórico de deformação sofrida pelo fluido, etc. Esses fluidos podem também exibir um comporo elástico, semelhante aos sólidos, além daquele inerente aos fluidos e, portanto, a essa classe de fluido chamamos de viscoelásticos[10].

2.3.1. Fluidos Newtonianos

Em um fluido parado, a tensão em qualquer ponto é a pressão hidrostática. Esta é uma tensão de compressão isotrópica, ou seja, tem a mesma magnitude em qualquer direção. Tais tensões podem ser expressas como:

$$\underline{T} = -p\underline{I} \quad (2.17)$$

E, em forma de componente,

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} \quad (2.18)$$

Onde

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

e,

δ_{ij} é o operador delta de Kronecker, sendo

$\delta_{ij}=1$ se $i=j$ e

$\delta_{ij}=0$ se $i \neq j$

Aqui será estabelecido que i e j tomam os valores 1, 2 ou 3 em todas as equações que utilizam esse operador. As componentes tangenciais (para $i \neq j$) da tensão isotrópica são nulas e as três componentes normais tomam o mesmo valor p , a magnitude da pressão[10].

Para um fluido em movimento, a tensão em qualquer ponto é uma combinação da pressão hidrostática e da tensão que surge a partir da deformação experimentada pelo fluido. Portanto é conveniente decompor-se o tensor tensão T_{ij} em uma componente isotrópica $-p\delta_{ij}$ e noutra não isotrópica τ_{ij} , ou seja,

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (2.19)$$

sendo o segundo termo da direita chamado de tensor tensão extra[10].

A relação entre o tensor tensão extra e a deformação é função da equação reológica constitutiva do fluido. A equação constitutiva descreve a deformação que surge a partir de uma especificada tensão extra, ou seja, conhecendo-se as deformações chega-se às tensões e vice-versa. Para os fluidos incompressíveis, o tensor tensão extra τ é diretamente proporcional ao tensor taxa de deformação \underline{e} , ou seja,

$$\underline{\tau} = 2\eta\underline{e} \text{ ou } \tau_{ij} = 2\eta e_{ij} \quad (2.20)$$

Onde η é a viscosidade.

Esta é uma equação constitutiva newtoniana. A maioria dos líquidos de baixo peso molecular e gases seguem esta equação e são denominados fluidos newtonianos. A viscosidade é a mais importante propriedade de escoamento do fluido, sendo bastante influenciada pela temperatura. Quando ocorre escoamento de um fluido, energia é requerida continuamente para manutenção deste escoamento e o trabalho produzido não é mecanicamente recuperável, sendo dissipado na forma de energia térmica. A resistência de um fluido ao escoamento se comporta como uma espécie de fricção interna a qual é dita ser a viscosidade. Deve-se ressaltar que para fluidos compressíveis (gases em geral) a equação constitutiva newtoniana deve ser modificada para levar em conta a compressibilidade deste[10].

Os viscosímetros são instrumentos desenvolvidos para medição da viscosidade. Os princípios básicos desses equipamentos podem melhor ser entendidos a partir do estudo da relação entre o tensor taxa de deformação e tensor tensão para um fluido escoando em uma determinada geometria[10].

2.3.2. Fluidos Não Newtonianos

Nas soluções poliméricas, fluidos de perfuração, fluidos de fraturamento e suspensões, etc, o tensor tensão extra pode não ser diretamente proporcional ao tensor taxa de deformação e portanto, uma simples equação constitutiva reológica não descreve o comportamento do escoamento desses fluidos. Para esses, a viscosidade definida como o quociente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é agora uma função do tensor taxa de deformação é:

$$\underline{\tau} = 2\eta(\underline{e})\underline{e} \quad (2.21)$$

A equação (2.21) é também chamada equação constitutiva newtoniana generalizada. A viscosidade de alguns fluidos não newtonianos pode variar várias ordens de magnitudes quando submetida a cisalhamentos. Além da sua viscosidade variável, estes fluidos exibem

outras características quando escoam, tais como tensões normais, tensões de relaxamento e tensões que dependem da história da deformação que não são observados em fluidos newtonianos e que também não podem ser calculados a partir da equação constitutiva newtoniana generalizada. Alguns fluidos não newtonianos exibem algumas características elásticas, além das características típicas de fluidos e por isso são chamados de fluidos viscoelásticos. Pela figura 2.10 pode-se entender melhor a diferença entre os fluidos inelásticos e viscoelásticos. Suponha um fluido confinado entre duas placas paralelas onde uma força é aplicada à placa superior, resultando num deslocamento de uma partícula exatamente abaixo da placa superior de uma distância dx . Agora imagine similar experimento realizado com um sólido elástico. O trabalho realizado para deslocar a partícula de fluido ou de sólido por uma distância dx é portanto Fdx . Para o caso de um fluido inelástico ser confinado entre as placas (fig.2.9a), após a remoção da força, a partícula do fluido no ponto A irá permanecer neste ponto, figura 2.10a[10].

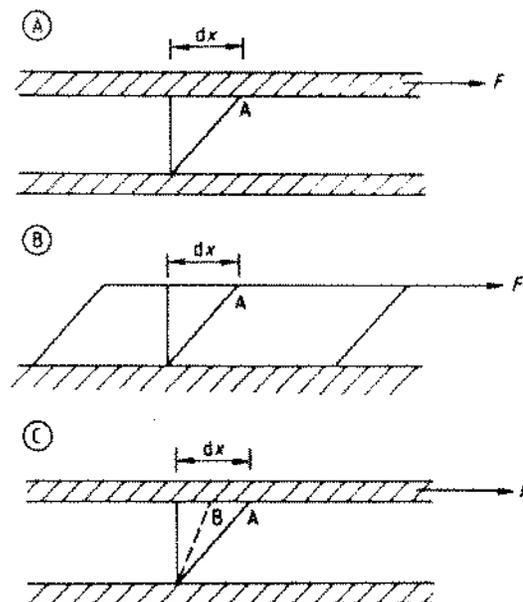


Figura 2.10 - Escoamento entre placas deslizantes

Todo o trabalho realizado neste fluido inelástico será dissipado na forma de calor e portanto, não é recuperado. Por outro lado, após a remoção da força atuando no sólido idealmente elástico (sólido Hookeano) a partícula de sólido no ponto A irá recuperar sua posição original (fig. 2.10b). Todo trabalho realizado sobre o sólido elástico é recuperado. Para o fluido viscoelástico, parcial recuperação é observada. A partícula de fluido em A recupera (após a retirada de F) uma posição intermediária entre os pontos A e B (fig. 2.10c). Uma porção do trabalho realizado sobre o fluido viscoelástico é recuperado enquanto o restante é dissipado como calor. Na realidade, a taxa de recuperação depende da taxa de deslocamento dx a que este fluido é submetido. Em geral, à medida que se aumenta a taxa de deslocamento, aumenta-se a taxa de recuperação. Portanto, pode-se descrever adequadamente um fluido inelástico pela determinação da sua viscosidade e pela variação desta com a taxa de cisalhamento, tempo de cisalhamento, etc. Embora a viscosidade seja um conceito de estado estacionário, é também aplicável em fluidos viscoelásticos sem qualquer modificação. Entretanto, além da viscosidade, outras propriedades devem ser medidas para caracterização de um fluido viscoelástico. A distinção entre fluidos inelásticos e viscoelásticos é claramente um problema de escala de tempo. Se manifestação de recuperável deformação elástica é observada numa escala de tempo que está sendo usada então o material é viscoelástico[10].

A figura 2.11, apresenta uma tabela de classificação reológica dos fluidos[26]. Nela os fluidos incompressíveis podem ser classificados em puramente viscosos(ou fluidos inelásticos)e fluidos viscoelásticos. Este ultimo grupo ,compreende sistemas de fluidos que apresentam características tanto de sólidos quanto de fluidos e exibem uma recuperação parcial após a deformação[10]. Nos fluidos viscoelásticos ,a tensão de cisalhamento esta relacionada com a taxa de deformação assim como com a deformação.

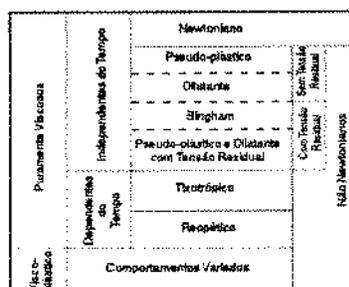


Figura 2.11 Classificação reológica dos fluidos

Os fluidos não newtonianos puramente viscosos podem ser classificados em dois grupos:

- Fluidos em que a taxa de cisalhamento em qualquer ponto é uma função da tensão de cisalhamento naquele ponto e não é função de mais nada (fluidos independentes do tempo);

- Fluidos mais complexos, onde a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento dependem do tempo de cisalhamento que este foi submetido (fluidos dependentes do tempo);

2.3.2.1. Fluidos Não Newtonianos Independentes do Tempo

Os fluidos não newtonianos chamados independentes do tempo podem ser representados através de uma equação constitutiva do tipo

$$\frac{du}{dy} = \dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2.22)$$

Por esta equação tem-se que a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ em qualquer ponto do fluido é função da tensão de cisalhamento τ naquele ponto.

A maioria dos fluidos não newtonianos pertencem a esta categoria. O fluido newtoniano pode ser considerado como um caso especial desse grupo, onde a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento é sempre constante, ou seja, a viscosidade aparente é constante. Os fluidos não newtonianos independentes do tempo são denominados de fluidos newtonianos generalizados.

Os fluidos não newtonianos independentes do tempo são comumente representados por três distintos modelos, como mostra a figura 2.12[73]:

a) fluido de Bingham,

b) fluido Pseudo-plástico e

c) fluido dilatante

FLUIDOS DE BINGHAM

Os fluidos de Bingham apresentam uma tensão residual de escoamento, τ_y , com uma taxa de deformação zero seguido por uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação figura 2.12a. Estes fluidos são definidos por dois parâmetros:

-a tensão residual τ_y , cujo o valor a tensão que atua no fluido tem que atingir para que este escoe e

-a viscosidade η_p que é a inclinação da porção reta da curva é também conhecida como coeficiente de rigidez ou viscosidade plástica

A equação para um fluido de Bingham é então [5]:

$$\tau = \left(\frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} + \eta_p \right) \dot{\gamma}, \tau \geq \tau_y \quad (2.23)$$

ou

$$\eta = \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} + \eta_p, \tau \geq \tau_y \quad (2.24)$$

Tanto a equação 2.23 quanto a 2.24 mostram que para tensões no fluido menores que a tensão residual não promovem movimento relativo no fluido, ou seja, ele se comporta como um corpo sólido[57]. O modelo pode representar o comportamento de vários fluidos não newtonianos tais como alguns fluidos de perfuração, tintas, plásticos fundidos, etc. Devido ao caráter linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, o modelo de Bingham se mostra bastante conveniente para formulações analíticas[5].

Apesar do modelo de Bingham representar satisfatoriamente uma determinada classe de fluidos não newtonianos independentes do tempo, não há nenhuma evidência convincente que algum fluido exiba exatamente o comportamento do fluido de Bingham quando a baixa taxa de cisalhamento [5]

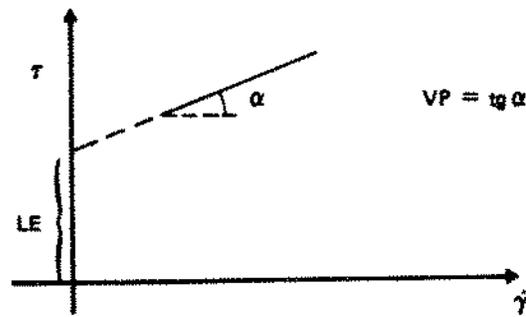


Figura 2.12

Reograma de um fluido de Bingham

FLUIDOS PSEUDO PLÁSTICOS

Os fluidos pseudo-plásticos, figura 2.12.b, não apresentam uma tensão residual τ_y e são caracterizados por uma razão sempre decrescente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.

De um modo geral, tanto a baixas quanto a altas taxas de deformação a viscosidade aparente é constante, ou seja, o fluido apresenta um comportamento newtoniano. Entretanto, para valores intermediários de taxa de cisalhamento, a viscosidade aparente é sempre decrescente.

Existem várias relações empíricas para representar fluidos pseudo-plásticos, entretanto a mais simples e a mais conhecida é a do modelo de Potência e que é expressa como [57]:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}; n < 1 \quad (2.25)$$

ou em termos de viscosidade aparente,

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}; n < 1 \quad (2.26)$$

As equações 2.25 e 2.26 possuem dois parâmetros que devem ser ajustados aos dados do fluido, sendo que K apresenta a dimensão de Pas^n e é chamado de índice de consistência e quanto mais elevado for o seu valor mais viscoso é o fluido. Por outro lado, n é um parâmetro adimensional e está associado ao caráter não newtoniano do fluido. Portanto, quanto mais o valor de n se afasta da unidade, mais acentua o caráter não newtoniano do fluido. Pela relação 2.26 verifica-se que quando a taxa de cisalhamento é zero a viscosidade aparente é

infinita. Além disso, quando a taxa de cisalhamento tende para o infinito a viscosidade tende para zero. Portanto estas são algumas das objeções contra a utilização deste modelo. Evidentemente, o modelo de Potência não pode representar o comportamento real de um fluido para toda faixa de tensão cisalhante. Outro problema, é que o fator n não é constante para toda faixa de taxa de cisalhamento assim como o valor de K apresenta uma dependência com n .

O modelo de Potência é extensivamente utilizado na resolução de problemas industriais devido a sua simplicidade analítica e também pela sua boa capacidade de representação do comportamento real do fluido[81].

FLUIDOS DILATANTES

Os fluidos dilatantes são similares aos fluidos Pseudo-plásticos no aspecto de não possuírem também uma tensão residual, figura 12.c. Entretanto, diferem dos Pseudo-plásticos no sentido que sua viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de deformação. Poucos são os fluidos reais que exibem o comportamento dilatante. Como ocorre com os fluidos Pseudo-plásticos, eles também podem ser representados pela lei de Potência onde o expoente n , empregado nas equações 2.24 e 2.25, é maior do que a unidade[85].

Exemplos de fluidos que exibem comportamento dilatante são:

-MAIZENA™

-silicato de potássio[85].

Apesar dos modelos clássicos, Bingham e Potência, serem muito difundidos nos meios científicos e industriais devido a simplicidade de suas relações, outros modelos mais complexos e mais precisos emergiram graças a popularização da informática[85].

A seguir serão apresentados alguns desses modelos que apresentam tensão residual e que apresentam grande aceitação nos meios acadêmico e industrial.

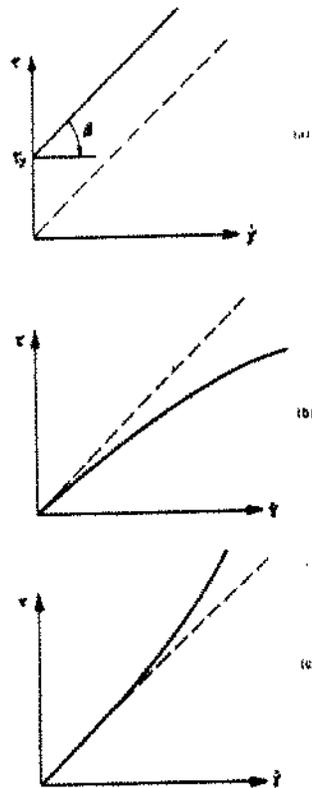


Figura 2.13 - Reograma de fluidos não newtonianos independentes do tempo

MODELO DE CASSON

Este é um modelo onde existe uma relação linear entre as raízes quadradas das tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Além disso, ele é um modelo de dois parâmetros, como são os modelos clássicos. A sua representação matemática é a seguinte:

$$\tau = \left[\frac{\tau_p^{1/2}}{|\dot{\gamma}|^{1/2}} + \eta_p^{1/2} \right]^2 \dot{\gamma}, \text{ para } |\tau| \geq \tau_y \tag{2.27}$$

ou

$$\eta = \left[\frac{\tau_p^{1/2}}{|\dot{\gamma}|^{1/2}} + \eta_p^{1/2} \right]^2 \dot{\gamma}, \text{ para } |\tau| \geq \tau_y \tag{2.28}$$

O ponto em que a curva de Casson intercepta o eixo da tensão de cisalhamento varia com a razão entre a tensão residual e a viscosidade plástica. Este modelo é bastante usado na indústria e em particular na alimentícia[20].

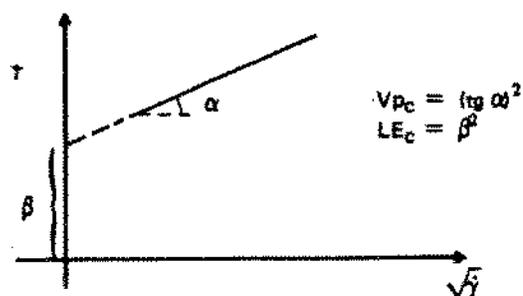


Figura 2.14

Reograma de um fluido de Casson

Muitos fluidos não conseguem um ajuste satisfatório através dos modelos reológicos clássicos, como Bingham e de Potência, principalmente nas faixas de menores valores de taxa de cisalhamento. Por isso foram desenvolvidos modelos reológicos híbridos. Os modelos de Robertson-Stiff e Herschel-Bulkley são exemplos desse caso[20].

MODELO HERSCHEL-BULKLEY

É um modelo de três parâmetros, o que permite um melhor ajuste dos dados experimentais. Abaixo é apresentada sua expressão matemática[20]:

$$\tau = \tau_{HB} + K_{HB}\dot{\gamma}^n, \tau > \tau_y \tag{2.29}$$

ou

$$\eta = \tau_{HB} + K_{HB}\dot{\gamma}^{n-1}, \tau > \tau_y \tag{2.30}$$

O modelo é na realidade um modelo de Potência contendo uma tensão residual, ou seja, o modelo de Potência deslocado em relação ao eixo das tensões de cisalhamento.

A obtenção dos parâmetros desse modelo é bastante trabalhosa porque envolve o uso de técnicas de regressão não linear em conjunto com métodos numéricos. Além disso, o desenvolvimento de expressões analíticas explícitas relacionando análise viscométrica com cálculos hidráulicos não é possível. Por tudo isso, seu uso é bastante restrito, ainda, principalmente na indústria.

Apesar desse modelo superar as deficiências do modelo de Potência para baixas taxas de cisalhamento através do uso do termo de tensão residual, o problema permanece para escoamentos a altas taxas de cisalhamento. A figura 2.14 apresenta um reograma $\tau \times \dot{\gamma}$ para esse modelo.

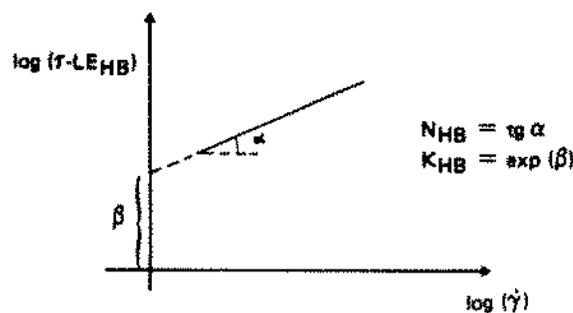


Figura 2.15 - Reograma de um Fluido de Herschel-Bulkley

MODELO DE STIFF-ROBERTSON

Este modelo, como o Herchel-Bulckley, é um híbrido dos modelos clássicos. Contém três parâmetros reológicos, sendo um deles a tensão residual. Sua expressão matemática é expressa como:

$$\tau = A(\dot{\gamma} + C)^B, \tau > \tau_{ex} \quad (2.31)$$

Vários autores têm desenvolvido expressões analíticas para análise de escoamentos para as geometrias tubular e anular, usando os parâmetros reológicos do modelo de Robertson-Stiff. Ohen [51], Beirute e Flumerfelt [6] desenvolveram expressões analíticas para escoamento laminar, tanto para tubos quanto para anulares. Abaixo apresenta-se os resultados obtidos:

Geometria Tubular:

perfil de velocidade:

$$V = \left(\frac{B}{B+1} \right) \left[\frac{1}{2A} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/B} \left(R^{\frac{B+1}{B}} - \pi^{\frac{B+1}{B}} \right) - C(R - \pi) \quad (2.32)$$

válida para $\pi > y$ e

$$V = \left(\frac{B}{B+1} \right) \left[\frac{1}{2A} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/B} \left(R^{\frac{B+1}{B}} - \lambda^{\frac{B+1}{B}} \right) - C(R - \lambda) \quad (2.33)$$

válida para $0 \leq \pi \leq \lambda$ e onde

- A, B e C são os parâmetros reológicos do modelo,
- R é o raio do tubo,
- π é a posição radial
- λ é a posição radial onde a tensão residual iguala-se a tensão de cisalhamento e é definido como $\lambda = \frac{(AC^B)}{\tau_R} R$

- ΔP é o diferencial de pressão,
- τ_R é a tensão residual,
- L é o comprimento do tubo.

Velocidade média:

$$\bar{V} = \left(\frac{RB}{3B+1} \right) \left(\frac{\tau_R}{A} \right)^{1/B} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{R} \right)^{\frac{3B+1}{B}} \right] - \frac{RC}{3} \left[1 - \left(\frac{\lambda}{R} \right)^3 \right] \quad (2.34)$$

Geometria Anular:

Perfil de velocidade:

$$V = \left(\frac{B}{B+1} \right) \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/B} \left(R^{\frac{B+1}{B}} - r^{\frac{B+1}{B}} \right) - C(R-r) \quad (2.35)$$

válida para $r > \lambda$

$$V = \left(\frac{B}{B+1} \right) \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{1/B} \left(R^{\frac{B+1}{B}} - \lambda^{\frac{B+1}{B}} \right) - C(R-\lambda) \quad (2.36)$$

válida para $0 \leq r \leq \lambda$, e onde:

$$\lambda = \left(\frac{2\tau_0}{\Delta P/L} \right); \quad (2.37)$$

• r é o raio anular interno e R o raio anular externo.

Ohen [51] desenvolveu o número de Reynolds generalizado para o escoamento anular, usando o modelo de Robertson-Stiff:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_{eq}}{\mu_e} \quad (2.38)$$

e

$$\mu_e = \frac{A(\dot{\gamma} + C)^B}{\dot{\gamma}} \quad (2.39)$$

onde:

- ρ é a massa específica,
- D_{eq} é o diâmetro equivalente, definido como $D_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}}(d_2 - d_1)$, onde d_2 é o diâmetro interno do tubo externo e d_1 é o diâmetro externo do tubo interno,
- μ_e é a viscosidade efetiva,
- \bar{V} é a velocidade média de escoamento.

Ataíde [2] desenvolveu uma expressão para o número de Reynolds para suspensões de bauxita, caulim e argilas usando o modelo de Robertson- Stiff, conforme definido abaixo, para escoamento em tubos:

$$Re_s = \frac{8\rho\bar{V}^2}{A\left[\left(\frac{3B+1}{4B}\right)\frac{8\bar{V}}{D} + \frac{4C}{3}\right]^B} \quad (2.40)$$

onde:

- A, B e C são parâmetros do modelo de Robertson-Stiff,
- \bar{V} é a velocidade média do escoamento,
- ρ é a massa específica da suspensão,

E a partir da consideração de que $Re_{sc}=2100$, desenvolveu uma relação implícita para a determinação da velocidade crítica, ou seja:

$$\bar{V}_c = \sqrt{\frac{2100A}{\rho} \left[\left(\frac{3B+1}{4B} \right) \frac{8\bar{V}_c}{D} + \frac{4C}{3} \right]^3} \quad (2.41)$$

Finalmente, para escoamento de suspensões em tubos, Ataíde [2] propôs:

$$f = \frac{0,262}{(Re_s)^{0,148}} \quad (2.42)$$

para tubos de diâmetros iguais a 2,16 cm e 3,58 cm.E

$$f = \frac{0,280}{(Re_s)^{0,184}} \quad (2.43)$$

para tubos de diâmetro 5,38 cm.

onde:

• f é o fator de fricção,

• Re_s é o número de Reynolds dado por (2.38)

Paixão [53] desenvolveu diversas expressões importantes para análise de escoamento de suspensões argilosas em tubos e anulares, usando o modelo Robertson- Stiff, conforme abaixo:

Número de Reynolds generalizado:

no tubo:

$$Re_s^* = \frac{2^{(3-B)} \rho \bar{V}^{(2-B)} D^B}{\left(\frac{3B+1}{B}\right)^B A} \quad (2.44)$$

no anular:

$$Re_s^* = \frac{12^{(1-B)} \rho \bar{V}^{(2-B)} D_{eq}^B}{\left(\frac{2B+1}{3B}\right)^B A} \quad (2.45)$$

Número de Hedstrom modificado:

no tubo:

$$H_E^* = \frac{\rho D^2}{A} C \mathbf{b}_B \mathbf{g} \quad (2.46)$$

no anular:

$$H_E^* = \frac{\rho D_{eq}^2}{\tau_0} \left(\frac{\tau_0}{A}\right)^{\frac{2}{B}} \quad (2.47)$$

Número de Reynolds generalizado crítico:

no anular:

$$(R_{ES}^*)_{crítico} = 2365,4(H_E^*)^{0,014} \quad (2.48)$$

Fator de fricção, válido para escoamento anular de suspensões argilosas:

$$f = \frac{0,0822}{(R_{ES}^*)^{0,292}} \quad (2.49)$$

onde, para as relações de Paixão[45] acima descritas:

- A, B, C são parâmetros reológicos do modelo Robertson-Stiff,
- τ_0 é a tensão residual,
- D é o diâmetro do tubo,
- D_{eq} é o diâmetro equivalente do anular.

2.3.2.2. Fluidos Não Newtonianos Dependentes do Tempo

Muitos fluidos reais não podem ser descritos por uma simples equação constitutiva reológica como a equação (2.22) que se aplica a fluidos em que a relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento é independente do tempo. A viscosidade de fluidos mais complexos depende não apenas da taxa de cisalhamento mas também do tempo de cisalhamento. Esses fluidos podem ser subdivididos em duas classes: fluidos tixotrópicos, ou fluidos reopéticos, dependendo se a tensão de cisalhamento decresce ou aumenta com o tempo, quando o fluido é cisalhado a uma taxa constante[10].

Fluidos tixotrópicos são aqueles cuja consistência depende tanto da duração do cisalhamento quanto da sua intensidade. Se o fluido tixotrópico é cisalhado a taxa constante, depois de um período parado, a estrutura será progressivamente quebrada e a viscosidade decrescerá com o tempo. A taxa de quebra da estrutura, durante cisalhamento a uma determinada taxa, dependerá do número de ligações estruturais disponíveis para a quebra e deve portanto decrescer com o tempo. Por outro lado a taxa de deformação estrutural aumentará com o tempo, à medida que o número de possíveis novas ligações aumentarem. Eventualmente um estado de equilíbrio dinâmico pode ser alcançado quando a taxa de

formação estrutural iguala-se à taxa de quebra destas. Neste caso, o fluido pode ser classificado como um fluido independente do tempo ou como viscoelástico[73][70].

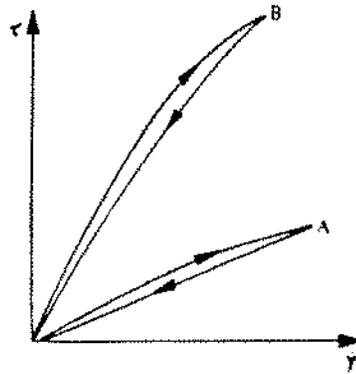


Figura 2.16 - Reograma de fluidos não newtonianos dependentes do tempo tixotrópicos

Se a curva de escoamento é obtida a partir de um simples experimento onde a taxa de cisalhamento é continuamente aumentada, a uma taxa constante, a partir de zero, até um valor máximo e então é decrescida à mesma taxa a partir do valor máximo até zero então é obtida uma curva de histeresis semelhante à da figura 2.15. A posição, forma e área da curva de histeresis depende da razão que a taxa de cisalhamento é aumentada e depois diminuída (a taxa de variação é a mesma nos processos de crescimento e decrescimento) ,além do seu histórico térmico e de cisalhamento. Entretanto este tipo de medida tem pouco significado na solução de problemas reais. Na realidade, o que é requerido é uma série de curvas experimentais entre a tensão e taxa de cisalhamento que pode ser convertida em uma série de curvas de escoamento tendo o tempo de cisalhamento como parâmetro.

A diferença entre tixotropia e pseudo-plasticidade é entendida a partir do tempo necessário para a quebra estrutural do fluido, que é finito e mensurável para um fluido tixotrópico, enquanto para o fluido pseudoplástico este tempo é muito pequeno e imensurável.

fluidos reopéticos são encontrados raramente e por isso os comentários sobre eles são limitados. Caracterizam-se pela formação de estruturas a partir de determinados níveis de cisalhamento, ao contrário dos fluidos tixotrópicos. Com experimentos semelhantes aos dos fluidos tixotrópicos podem ser obtidas curvas para os reopéticos, entretanto o sentido das curvas é contrário as dos fluidos tixotrópicos, apresentadas na figura 2.15. A área determinada pelas curvas, como ocorre com os tixotrópicos, dá uma idéia do grau de reopeticidade do fluido.

2.4. Fluido de Perfuração

O fluido de perfuração é um fluido circulante usado na perfuração rotativa visando realizar um conjunto de funções a ele requerido, numa operação de perfuração[11].

Isto implica que a perfuração rotativa se tornaria impraticável sem o seu uso, daí sua importância na tecnologia de perfuração. Na figura 2.17 é mostrado o trajeto realizado pelos fluidos de perfuração, numa operação perfuradora[11].

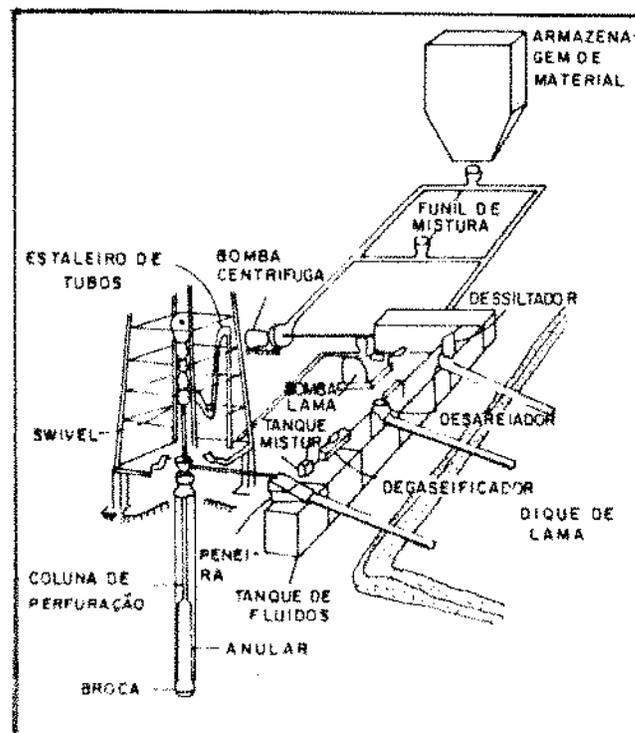


Figura 2.17 - Sistema de circulação em uma perfuração rotativa

As principais funções de um fluido de perfuração são:

a) resfriar e lubrificar a broca perfuradora:

Durante a operação de perfuração, considerável quantidade de calor e fricção são gerados devido ao contato da broca e coluna de perfuração com a formação. O fluido de perfuração dissipa o calor e portanto resfria-se à medida que retorna à superfície. Além disso, o fluido de perfuração lubrifica a broca e coluna ao promover a redução da fricção. A maioria dos fluidos de perfuração são bons lubrificantes uma vez que na sua composição estão contidos aditivos redutores de fricção tais como a bentonita e alguns polímeros[11].

b) limpeza do fundo do poço e da broca:

Esta função é uma das mais importantes para o fluido de perfuração mas também uma das mais difíceis. Muitas variáveis são envolvidas e interferem no projeto dos fluidos de perfuração. Algumas delas são: peso sobre broca, velocidade da rotação, tipo de broca, vazão, velocidade dos jatos, diferencial de pressão entre a coluna de fluidos e as formações do foco, diâmetro dos jatos, concentração de sólidos no fluido de perfuração, filtrado do fluido de perfuração, etc[11].

c) transporte do cascalho gerado, para a superfície:

Uma das funções vitais de um fluido de perfuração é o transporte dos sólidos (cascalho), gerados pela ação da broca sobre a formação, para a superfície através do anular. Este processo é basicamente dependente do perfil da velocidade anular, da densidade do fluido e de suas propriedades reológicas. Outros fatores que também afetam são inclinação do poço, excentricidade do anular, densidade e geometria dos cascalhos.

A não remoção adequada dos cascalhos pode provocar uma série de problemas para a operação de perfuração tais como prisão da coluna de perfuração, perdas de circulação, encerramento da broca, redução da taxa de penetração, etc[11].

d) estabilização das paredes do poço.

Esta operação envolve a escolha adequada do fluido de perfuração e suas propriedades para manter-se as paredes já perfuradas (e não revestidas) em condições seguras de estabilização durante as operações de perfuração[11].

Os especialistas em fluido de perfuração estão relacionados a atividades tais como seleccionar os fluidos de perfuração mais adequados às diversas fases da perfuração, à otimização dos custos envolvidos com fluidos e à minimização de problemas de poços que estejam relacionados com o fluido de perfuração[11].

Entretanto, a seleção do fluido de perfuração, para determinada atividade, é seguida pelos seguintes critérios[11]:

- Tipo de formação a ser perfurada
- O intervalo de temperaturas, permeabilidade, pressão de poços e resistência das formações a serem perfuradas.
- O procedimento a ser usado nas avaliações das formações
- A qualidade da água disponível, para utilização na confecção e manutenção do fluido.
- Considerações ecológicas e ambientais.

Por exemplo, quando está prevista a perfuração de formações inconsolidadas (tais como areia) ,nas proximidades da superfície pode-se utilizar fluidos à base de água simples; enquanto que para perfurar-se intervalos de domos salinos em regiões onde não existem restrições ao meio ambiente pode-se empregar o fluido de emulsão inversa ;no caso de formação com elevada pressão de poros ,deve-se empregar fluidos mais densos e, finalmente, a perfuração de zonas com gradiente de pressões anormalmente baixas ou depletadas, em determinadas condições, requer o uso do fluido aerado.

A maioria dos fluidos a base de água são formados, pela seguinte composição[11]:

- Água

- Argila (viscosificante e redutor de filtração para formação).
- Amido ou polímero (para redução da filtração para formação)
- Sal cloreto de sódio((opcional) para inibição e secundariamente adensante)
- Afinantes(usado para controle da dispersão de sólidos e das propriedades reológicas)
- Diversos polímeros(inibição, controle de filtrado, etc.)
- Adensantes(para fornecer ao fluido determinado peso específico.)

Os fluidos a base de óleo podem ser: emulsões inversas (o mais usado dessa classe) e emulsões verdadeiras. As emulsões inversas são obtidas pela dispersão de gotículas de água no óleo, usando-se concentrações de sal conforme a atividade química necessária para balancear aquelas das águas das formações[11].

Para manter a estabilidade da emulsão são adicionados emulsificantes. E no controle ecológico são empregados alguns aditivos.

Para adensá-lo usam-se adensantes e/ou sal.

Além dessas duas classes de fluidos, as mais usadas, existem os fluidos aerados, espumas, ar, etc. Estes são, na realidade, de uso bastante restrito por envolverem elevados custos econômicos e dificuldades operacionais e por isso só são empregados em casos extremos que os justifiquem[11].

Mas para fazer um perfeito controle das propriedades requeridas para determinada operação, durante a perfuração, são empregados um conjunto de testes padronizados e de fácil e rápida execução:

-com uso de viscosímetros rotativos, se faz o controle das propriedades reológicas do fluido.

- com um conjunto de testes químicos, feitos com o fluido de perfuração, com o seu filtrado(obtido a partir de um filtro prensa) faz-se uma série de testes químicos para determinar

propriedades tais como alcalinidade, pH, dureza, salinidade, tipo de sal e possíveis contaminantes do fluido.

- são determinados também a filtração estática e dinâmica do fluido de perfuração visando ter uma idéia da invasão da água do fluido na formação e também o quanto de calafetação o fluido produz na formação[11].

-com testes de retorta, são determinados os teores de óleo, água e sólidos presentes no fluido em utilização e através de cálculos rápidos pode-se saber o percentual aproximado dos sólidos presentes na lama. Para os fluidos de emulsão inversa os valores da retorta permitem a determinação da razão óleo/água, parâmetro importante no controle da estabilidade destes fluidos. Com o uso de medidores eletrônicos pode-se saber os valores das estabilidades elétricas das emulsões inversas, também.

- A balança de lama permite a obtenção do peso específico do fluido e assim controlá-lo adequadamente.

Existem muitos outros testes, sendo os descritos acima os principais. Finalmente, através de cálculos rápidos, os técnicos e engenheiros especialistas em fluidos de perfuração acompanham a hidráulica de perfuração, concentrações de aditivos, etc[11].

CAPÍTULO 3

Aparato Experimental

A execução de toda parte experimental foi realizada no simulador hidráulico de superfície (SHS), pertencente ao DIPLOT/SEPEF, no Centro de Pesquisas da Petrobrás, figura 3.1.

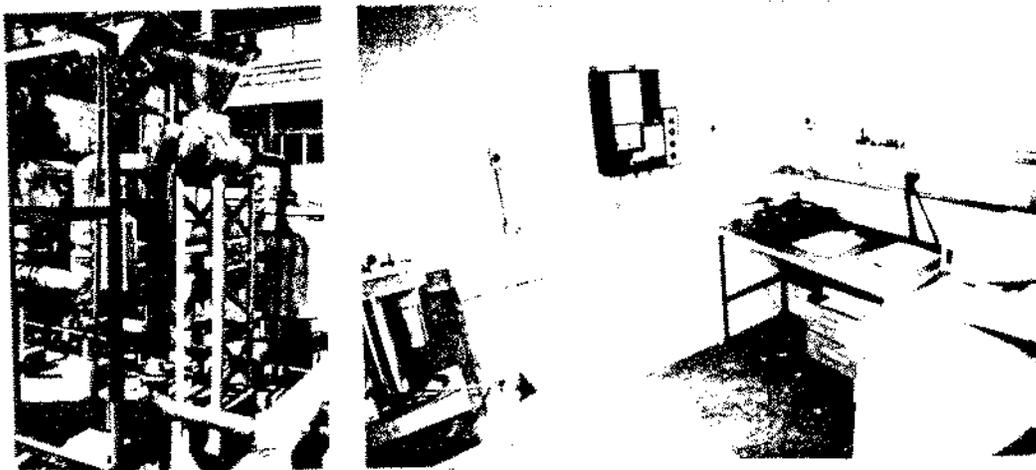
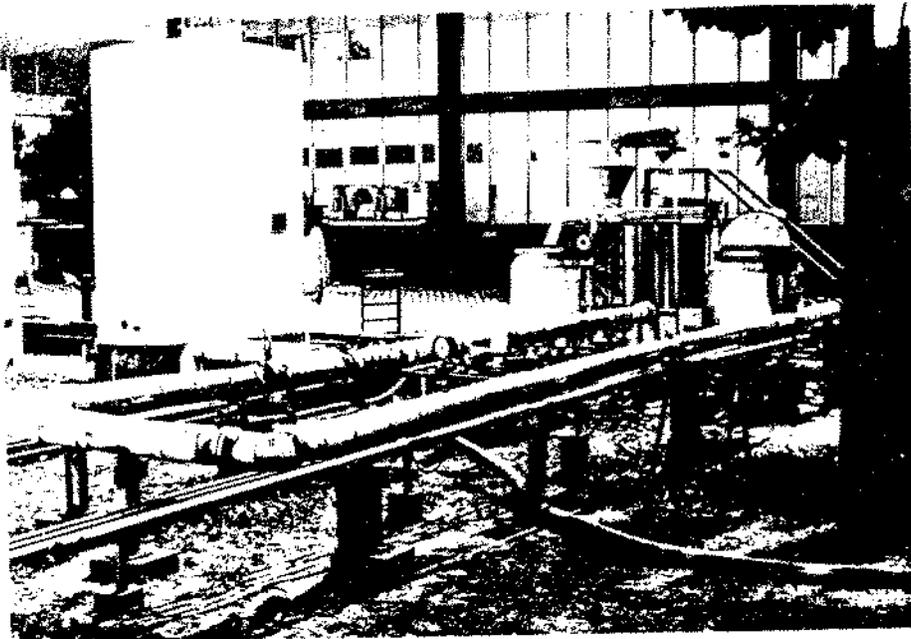


Figura 3.1 - Instalações do simulador hidráulico de superfície (SHS)

3.1. Simulador Hidráulico de Superfície

O simulador hidráulico de superfície é composto de dois circuitos intercalados que permitem a preparação de fluidos ou pastas e seu posterior deslocamento. O diagrama, na figura 3.2 representa o lay-out do SHS. Pode-se perceber que ele é dividido em dois poços independentes (circuitos).

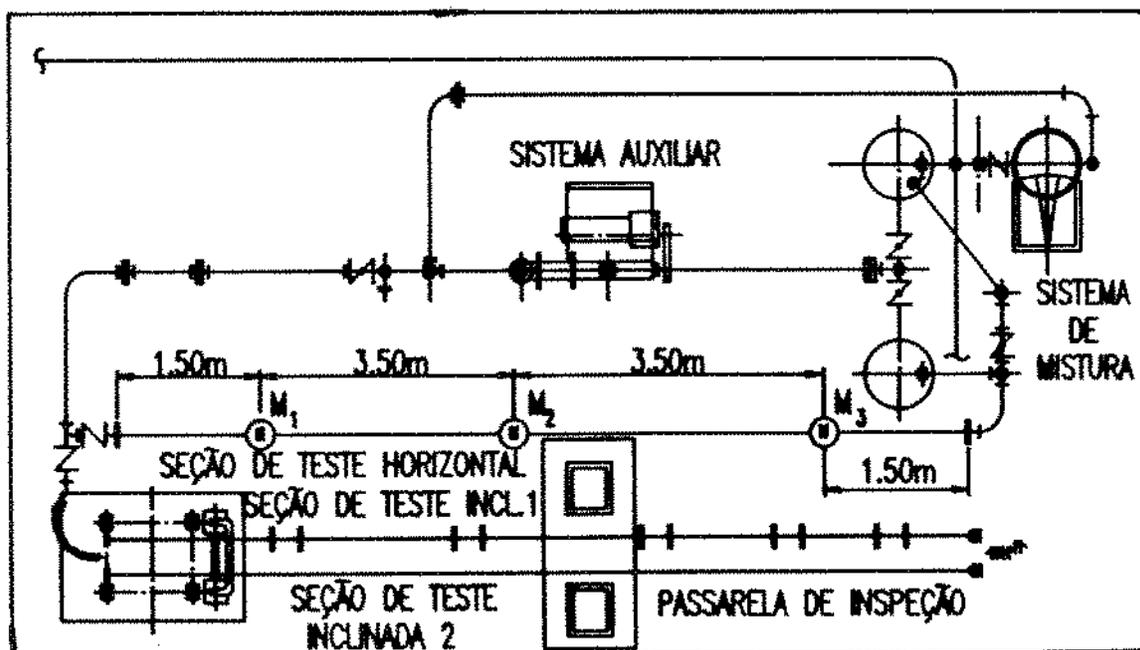


Figura 3.2 - Diagrama esquemático do simulador hidráulico de superfície (SHS)

O primeiro deles, o poço teórico, possui diâmetro constante e é posicionado na horizontal. Pode ser usado tanto para escoamento tubular quanto anular, sendo que, no caso

anular, faz-se uso de tubos concêntricos. Esse "poço" é usado em estudos de escoamento de pastas de cimento, fluido de perfuração ou outros fluidos.

O segundo poço simula situações reais pois além de ser levado em conta parâmetros como fatores de forma (excentricidade e alargamento), é considerada a movimentação do poço da posição horizontal até a vertical, passando por inclinações com precisão de $2,5^\circ$. Esse leque de possíveis inclinações do poço, assim como os fatores de excentricidade e de alargamento, são úteis em estudos sobre hidráulica de perfuração, escoamento e aderência de pastas de cimentação entre muitas outras utilizações.

O SHS é um simulador de deslocamento de fluidos do tipo contínuo e permite medidas de temperatura, pressão e vazão, formado por equipamentos de linha, tais como medidores de pressão, sensores de temperatura, bomba de deslocamento positivo, válvulas e drenos. Na tabela (3.1) são apresentadas dimensões e capacidades principais do simulador hidráulico de superfície (SHS) e na tabela (3.2) são apresentados arranjos reais possíveis de anulares poço-revestimento. Existe, também, no SHS um laboratório onde encontram-se o painel de controle das bombas e outros instrumentos tais como viscosímetros, balanças, termômetros, etc.

3.1.1. Instalação Piloto

Para medição dos valores de diferenciais de pressão, a variadas vazões e concentrações, foi usada a seção de teste horizontal do SHS (fig.3.2). Então, para isso, usou-se:

- Tubo com 1"(2,54 cm) de diâmetro externo, schedule 80, de comprimento total igual a 9,33 m, sendo o comprimento da seção de teste igual a 6,59 m.
- Tubo com 1 1/4"(3,18 cm) de diâmetro externo, schedule 40, de comprimento total igual a 9,60 m, sendo o comprimento da seção de teste igual a 7,00 m.

•Anular formado com tubos de 3"(7,62 cm) e 2"(5,08 cm) de diâmetros externos, schedule 40, de comprimento total igual a 9,50 m, sendo o comprimento da seção anular de teste igual a 7,10 m.

A queda de pressão observada em cada um dos intervalos foi medida usando-se manômetros de pressão calibrados para a faixa de zero a 6 Kg/cm², sendo aferida a sua calibração a cada batelada de testes, no setor de instrumentação do CENPES. A variação da vazão era obtida através da variação da rotação da bomba, feita através de um variador eletromagnético que possibilitava um gradativo aumento da vazão da bomba helicoidal.

A partir da curva de rotação vs. vazão, obtida experimentalmente com os fluidos usados nos testes, podia-se saber a vazão de bombeio para dada rotação da bomba. Foi então fixado um conjunto definido de valores de rotações e passou-se a usá-los para as medidas de diferencial de pressão para os dois tubos e o anular. Com isso, tinha-se certeza de obter-se sempre o mesmo conjunto de valores de vazão para todos conjuntos de medidas. O controle de temperatura era realizado através de termômetro de mercúrio, com escala de valores em grau centígrado.

Tabela 3.1: Dimensões e Capacidades Principais do Simulador SHS

Trecho anular I (AI)	$\zeta_1 = 0,62$
Trecho anular II (AII)	$\zeta_2 = 0,78$
Extensão do trecho experimental	$L = 7m$
Inclinação do trecho experimental	$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
Sensores de pressão	$0.1bar \leq P \leq 10bar$
Sensores de temperatura	$0^\circ C \leq T \leq 90^\circ C$
Vazão da bomba	$2m^3/h \leq Q \leq 40m^3/h$
Placas de orifício	$1m^3/h \leq Q \leq 35m^3/h$
Tanques	350ℓ
Variação média do NR_c (pastas de cimento)	$10^2 \leq NR_c \leq 10^4$

Tabela 3.2: Arranjo Real Poço X Revestimento, cm

Diâmetro do Poço (d_1)	Diâmetro do Revestimento (d_2)	$\zeta = \frac{r_1}{r_2}$
21,59	17,78	0,82
21,59	13,97	0,64
24,13	17,78	0,73
44,45	33,97	0,76

3.2. Preparação e Movimentação da Solução

O volume de água potável necessário ao preparo da solução era inicialmente armazenado num dos tanques circulares, com capacidade de 350 l. Em seguida, era adicionada uma quantidade de bentonita previamente hidratada, necessária para fornecer uma concentração de 6 libras/barril ao sistema. Era também adicionada uma quantidade de soda cáustica ao sistema para a manutenção do pH entre 9,0 e 10,0, ideal para maximizar o rendimento da bentonita. Essa suspensão era mantida em circulação por 15 minutos para homogeneização. Em seguida, era adicionada a quantidade de cloreto de sódio necessário para fornecer à suspensão uma salinidade de 30.000 ppm. O sistema circulava, então, por mais 15 minutos para homogeneização. Finalmente, era adicionada poliacrilamida hidrolisada, numa quantidade necessária para a obtenção da concentração desejada e o sistema era novamente circulado por mais 5 minutos.

Após essa etapa, eram realizadas medidas do diferencial de pressão a várias vazões. O valor definitivo de cada diferencial de pressão a uma dada vazão, era obtido após repetidas leituras para garantir-se a confiabilidade dos valores obtidos. Após a obtenção de cada conjunto de dados, para uma dada concentração de poliacrilamida hidrolisada, todo o volume era descartado e o tanque limpo e enchido com água. Então, circulava-se por 30 minutos ou mais, nas concentrações mais elevadas de polímeros, visando a limpeza adequada de todo o sistema hidráulico de superfície. Após esse procedimento, tornava-se a confeccionar o fluido de perfuração segundo o procedimento descrito anteriormente.

3.3. Determinação dos Diâmetros Internos dos Tubos

As determinações dos diâmetros internos dos tubos e do anular usados nas medidas do diferencial de pressão em função da vazão, foram realizadas através da medida do comprimento dos tubos e do anular e da determinação do volume de água necessário para preenchê-los. Para cada condutor foram realizadas 5 medições, sendo considerada a média

aritmética das mesmas como representativa do comprimento e do volume do tubo. Os valores de diâmetro calculados, os valores especificados pelo fabricante, assim como os erros relativos são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3.3 - Valores Medidos e Especificados dos Diâmetros das Tubulações

Diâmetro Nominal (cm)	Diâmetro Interno Calculado (mm)	Diâmetro Interno Especificado (mm)	Erro Relativo (%)
2,54	23,37	24,31	3,86
3,18	33,65	35,05	3,98
Anular 7,62/5,08	14,01*	14,35*	2,44

Obs:* diâmetros equivalentes

3.4. Teste do SHS com Água

Antes de iniciar as medidas dos diferenciais de pressão em função da vazão, com fluido de perfuração, realizou-se um teste com água pura, para avaliação do desempenho do SHS. Foram feitas medidas de diferencial de pressão para o conjunto de valores de vazão "padronizado", conforme descrito na secção 3.1.1. E com os valores da vazão calculou-se os valores teóricos de perda de carga, para o tubo de 1", usando a equação de Darcy . Então foi graficado a vazão vs. diferencial de pressão teórico e calculado (figura 3.2). O desempenho do SHS foi considerado satisfatório, já que houve acordo entre valores experimentais e calculados para a perda de carga.

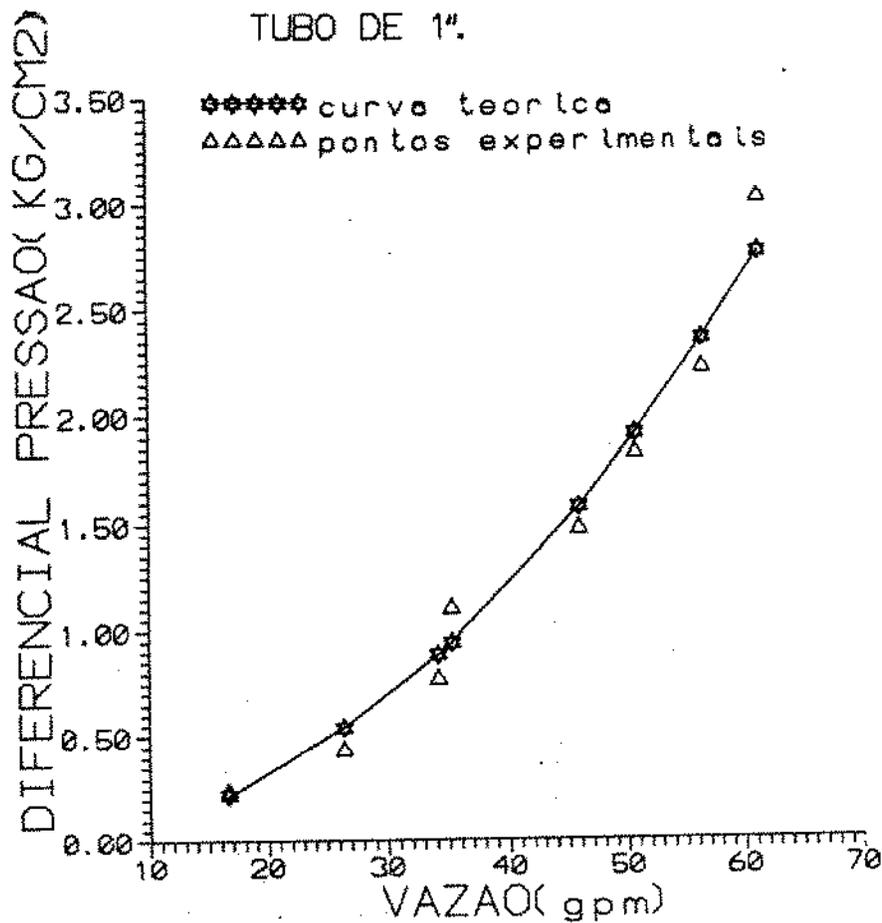


Figura 3.3 - Vazão versus valores de perda de carga teórico e experimental, respectivamente, no escoamento de água à 25° C

3.5. Obtenção das Medidas: Queda de Pressão - Vazão

Antes de iniciar a descrição do procedimento usado para a determinação dos diferenciais de pressão do fluido de perfuração escoando num dos três dutos em estudo, deve-se fazer algumas considerações:

- As concentrações de poliacrilamida hidrolisada, presentes no fluido de perfuração, variaram entre 0 e 7133 ppm (correspondente a 0 e 2,50 lb/bbl);

-para facilitar os experimentos, convencionou-se um conjunto de vazões, para todos os testes de determinação do diferencial de pressão. A figura 3.3 apresenta esses valores em função da rotação da bomba;

-os mesmos procedimentos foram realizados para os tubos de 2,54 cm, 3,18 cm, e o anular 7,62/5,08 cm.

O fluido de perfuração, contendo uma concentração fixa, era bombeado do tanque para o duto em estudo a uma vazão constante e fixa. Eram a seguir realizadas as leituras nos manômetros, posicionados nos dutos, de maneira a ultrapassar o comprimento de entrada. Como os ponteiros desses manômetros apresentavam grande oscilação ao redor do valor provável, eram feitas 8 leituras da pressão e registrado o valor médio dessas, para cada manômetro. Com isso pretendia-se a minimização de possíveis erros de leitura. Essas oscilações ocorriam predominantemente nas vazões mais elevadas e nos fluidos com concentrações maiores. Após a conclusão dessas medidas de pressão era mudada a vazão e novamente repetia-se o procedimento acima.

Após a obtenção de diferenciais de pressão com uma determinada concentração, trocava-se o fluido por outro de concentração diferente e seguia-se a rotina acima. Após a realização dos testes com todas as concentrações convencionadas, trocava-se o duto e repetia-se todo o procedimento anterior.

As tabelas 3.4, 3.5, e 3.6 apresentam os resultados desses testes com tubos de 2,54 cm, 3,18 cm e o anulo 7,62/5,08 cm.

Após as medidas dos diferenciais de pressão para cada concentração, eram coletadas amostras do fluido e medidas as propriedades reológicas com um viscosímetro Fann, à mesma temperatura dos testes no SHS. Os resultados de alguns desses testes são também incluídos nas tabelas 3.4, 3.5, e 3.6.

Após cada teste, com o fluido contendo uma determinada concentração do polímero, descartava-se todo o fluido e limpava-se cuidadosamente o sistema SHS e o tanque com água, visando evitar a influência de resíduos dos testes anteriores nas próximas medidas.

3.6. Viscosímetro Rotativo

Na obtenção dos dados reológicos, foi utilizado um viscosímetro rotativo Fann V635A. Basicamente esse aparelho é o dos fluidos tixotrópicos, apresentadas na figura 3.5. A área determinada pelas curvas, como ocorre com os tixotrópicos, dá uma idéia do grau de reopetividade do fluido. é formado por, figura 3.5:

- Cilindro ou rotor,
- Bob,
- Dial,
- Mola de precisão,
- Motor acionador.

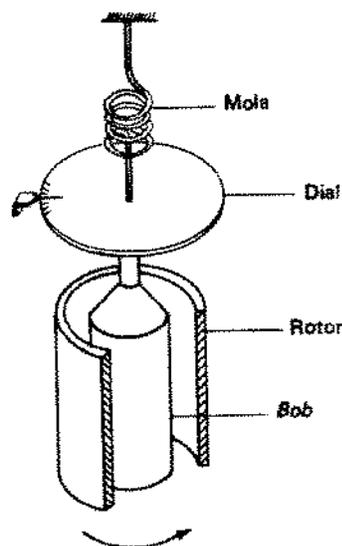


Figura 3.5 -

Esquema de um viscosímetro Fann

O rotoviscosímetro é acionado pelo motor que com isso possibilita ao cilindro ser submetido a dez velocidades: 3, 6, 30, 60, 90, 100, 180, 200, 300, e 600 rpm. Então o fluido que ocupa o anulo rotor/"Bob" imprime ao Bob um torque que é transmitido à mola de precisão. Com isso, a deflexão da mola é mostrada no dial do aparelho. Vale observar que tanto o Bob quanto o rotor, alinhados concentricamente, são imersos no fluido testado. Além disso, esse conjunto fica posicionado no interior de um copo fixo. Na tabela (2.1) apresenta-se um conjunto de especificação técnica do equipamento usado. A aferição das condições da mola é feita com o uso de uma solução aquosa de glicerina 50% em volume, que apresenta uma viscosidade absoluta igual a 0.20 Pa à 25 °C. A tabela (2.2) apresenta valores padrões de taxa de deformação e tensão de cisalhamento prevista para algumas rotações, o que auxilia na verificação da calibração. Durante a realização dos experimentos era realizado frequentemente o teste de calibração do viscosímetro.

Tabela 3.4 Especificação do viscosímetro Fann

MODELO	VOLTAGEM (Volts)	FREQUÊNCIA (hz)	AMPERAGEM (amps)	ROTAÇÃO (rpm)
35A	115	60	0,75	3,6,100,200,300 e 600
35SA	115	50	0,60	3,6,100,200,300 e 600
34A	12	CA-CD	3,5	300,600 e rotação de mistura
HC34A	MANUAL			300 e 600

O viscosímetro Fann permite o uso de várias combinações de dimensões de diâmetros do rotor e do *Bob*, conforme a necessidade do usuário. Existem opções de molas de precisão também.

Tabela 3.5 Verificação da calibração do viscosímetro

rpm	Taxa de Deformação (s ⁻¹)	Tensão Cisalhante (dina/cm ²)
600	1 022	210
300	511	105
200	340	70
100	170	35

Através da leitura do dial para várias velocidades de rotação, obtém-se a caracterização reológica do fluido testado, $\dot{\gamma} = f(\tau)$

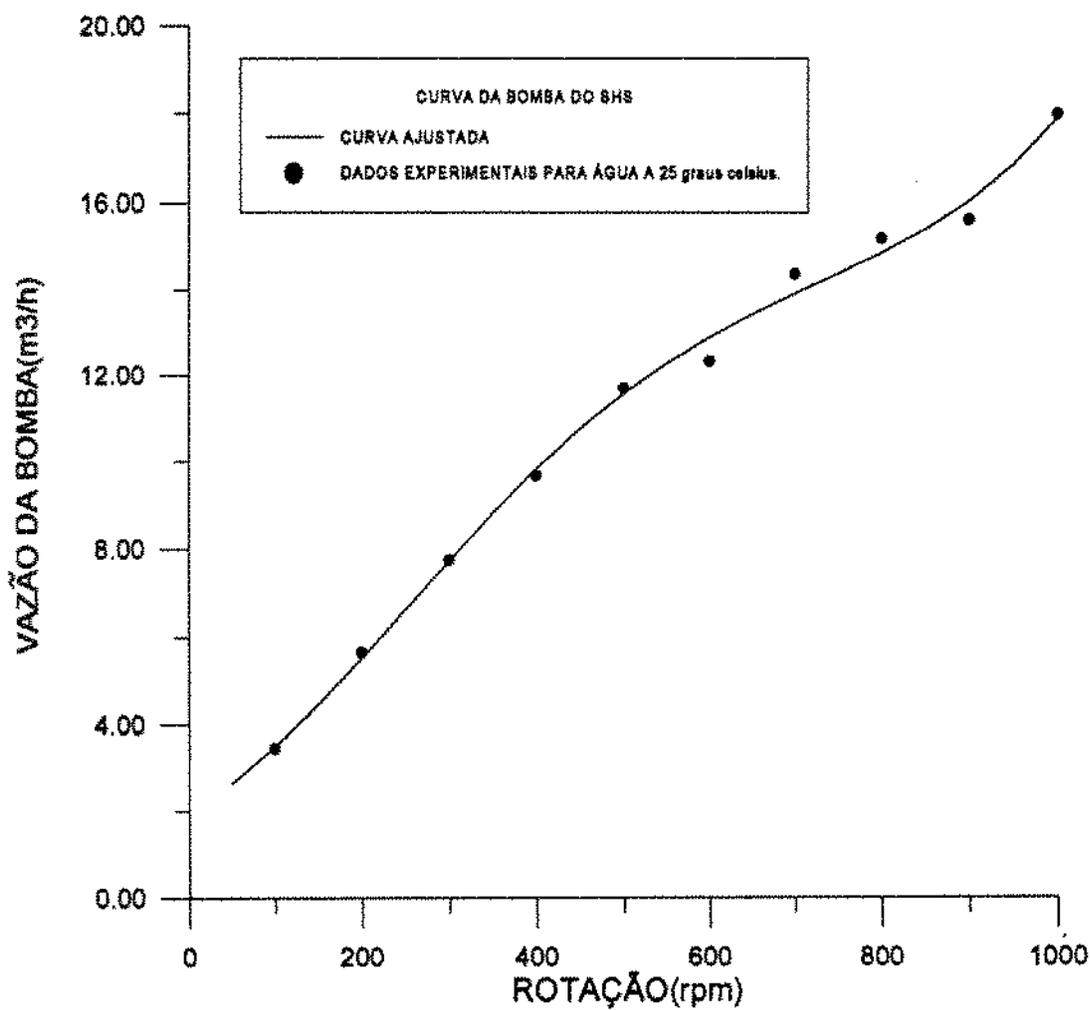


Figura 3.3 - Vazão versus rotação, para a bomba do SHS

Tabela 3.6 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o tubo de 2,54 cm e propriedades reológicas

Conc (ppm)	0,000	713	1141	1283	1426	1568	1711	1854	1996	2139	2282	2852	3565	4278
Rotação (rpm)	04/05/93	05/05/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	06/06/93	07/05/93	03/06/93	03/06/93
100	0.200	0.270	0.120	0.008	0.075	0.085	0.080	0.090	0.095	0.090	0.080	0.110	0.110	0.135
200	0.480	0.475	0.855	0.880	0.305	0.290	0.300	0.265	0.280	0.260	0.300	0.290	0.300	0.355
300	0.81	0.670	0.395	0.505	0.500	0.505	0.505	0.465	0.51	0.465	0.510	0.515	0.520	0.670
400	1.151	0.880	0.640	0.710	0.710	0.750	0.715	0.700	0.725	0.865	0.710	0.795	0.820	0.950
500	1.495	1.050	0.810	0.925	0.925	0.950	0.910	0.890	0.875	0.800	0.940	0.985	1.050	1.320
600	1.665	1.265	0.955	1.150	1.130	1.145	1.150	1.065	1.130	1.070	1.145	1.185	1.340	1.710
700	1.950	1.415	1.180	1.37	1.350	1.330	1.325	1.300	1.315	1.250	1.330	1.400	1.600	1.975
800	2.180	1.595	1.420	1.520	1.520	1.550	1.505	1.480	1.505	1.470	1.493	1.500	1.850	1.975
900	2.435	1.685	1.620	1.730	1.715	1.790	1.715	1.695	1.700	1.685	1.700	1.690	2.240	2.506
1000	2.650	1.700	1.820	1.940	2.025	2.040	1.940	1.935	1.930	1.880	1.910	2.200	2.515	2.840

θ_{200}	7.9	6.1
θ_{300}	5.1	4.0
θ_{400}	5.0	3.0
θ_{500}	3.9	3.0
θ_{600}	4.9	2.5
θ_{800}	3.5	2.4
θ_{900}	3.2	2.0
θ_{1000}	2.9	1.1
$\theta_{1.2}$	2.1	1
$\theta_{1.5}$	2.0	1
$\theta_{1.8}$	1.9	1.0
$\theta_{2.0}$	1.5	1.0
Temp (°C)	35	
Dados Reológicos		

Conc (ppm)	4991	5704	6417	7130	8556
Rotação (rpm)	03.06.93	03.06.93	04.06.93	04.06.93	06.06.93
100	0.135	0.130	0.143	0.150	0.170
200	0.370	0.370	0.390	0.395	0.415
300	0.670	0.680	0.710	0.745	0.770
400	1.000	1.005	1.015	1.025	1.035
500	1.355	1.420	1.490	1.505	1.600
600	1.735	1.895	1.720	1.735	1.795
700	2.070	1.995	1.995	2.050	2.080
800	2.280	2.280	2.310	2.360	2.400
900	2.600	2.590	2.820	2.670	2.715
1000	2.915	3.580	3.705	3.850	3.945

Tabela 3.7 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o tubo de 3,18 cm e propriedades reológicas

Conc (ppm)	0,000	713	1141	1283	1425	1569	1711	1854	1996	2139	2282	2852
Rotação (rpm)	04,05,9 3	20,05,9 3	27,05,9 3	27,05,9 3	27,05,9 3	28,05,9 3	28,05,9 3	28,05,9 3	28,05,9 3	20,05,9 3	28,05,9 3	27,05,9 3
100	0,110	0,015	0,005	0,005	0,010	0,005	0,010	0,030	0,015	0,030	0,005	0,030
200	0,175	0,045	0,030	0,008	0,080	0,060	0,040	0,090	0,095	0,040	0,025	0,050
300	0,215	0,090	0,075	0,135	0,150	0,085	0,110	0,185	0,320	0,070	0,100	0,150
400	0,275	0,180	0,110	0,185	0,210	0,120	0,190	0,270	0,350	0,145	0,150	0,170
500	0,350	0,280	0,145	0,200	0,275	0,170	0,280	0,380	0,420	0,195	0,200	0,215
600	0,420	0,295	0,185	0,275	0,370	0,195	0,380	0,485	0,570	0,220	0,330	0,270
700	0,500	0,365	0,245	0,370	0,425	0,225	0,470	0,620	0,700	0,280	0,355	0,310
800	0,550	0,400	0,285	0,405	0,500	0,280	0,620	0,780	0,730	0,370	0,425	0,380
900	0,625	0,490	0,320	0,475	0,600	0,275	0,745	0,920	0,950	0,450	0,520	0,470
1000	0,755	0,480	0,330	0,595	0,695	0,305	0,765	1,050	1,000	0,495	0,610	0,540

θ_{min}	7,9	6,9	11,5	10	6,1	11,1	-	8,1	-	7,9	10	10,5
θ_{max}	5,1	4,0	7,1	6,5	3,9	7,1	-	5,5	-	5,5	6	7,9
θ_{200}	5,0	3,5	5,5	5	3,1	5,5	-	3,1	-	4,0	5	5,5
θ_{100}	4,9	3,1	5,1	4,9	3,0	5,1	-	4,1	-	4,0	4,9	5,0
θ_{100}	3,9	2,5	3,1	3,5	2,0	3,1	-	3,1	-	3,0	3,1	3,5
θ_{50}	3,5	2,1	3,1	3	2,0	3	-	3	-	2,9	3	3,1
θ_{50}	3,2	2	2,5	-	1,9	2,5	-	2,1	-	2,5	2,5	2,9
θ_{50}	2,9	1,5	1,1	-	1,5	1,9	-	1,9	-	1,5	2,0	2
θ_{50}	2,1	1	1	1	1	1	-	1,1	-	1,5	2,5	1,1
θ_{50}	2,0	1	1	1,0	1,0	1	-	1,0	-	1,0	1	1
θ_{50}	1,9	1	1	1	1	1	-	1	-	1	1	1
θ_{50}	1,5	1	1	1,0	0,05	1	-	1	-	1	1	1
Temp (°C)	33,5	28,5	27	26,5	33,5	28,5	-	26	-	26	26	27

Dados Reológicos

Conc (ppm)	3585	4278	4991	5704	6417	7130	8556
Rotação (rpm)	29,05,9 3	30,05,9 3	24,05,9 3	30,05,9 3	30,05,9 3	30,05,9 3	30,05,9 3
100	0,015	0,055	0,040	0,030	0,060	0,020	0,020
200	0,070	0,080	0,040	0,035	0,050	0,050	0,050
300	0,150	0,065	0,080	0,080	0,065	0,070	0,080
400	0,185	0,100	0,110	0,100	0,125	0,100	0,110
500	0,240	0,133	0,150	0,120	0,180	0,140	0,145
600	0,275	0,155	0,180	0,185	0,200	0,150	0,165
700	0,320	0,190	0,240	0,210	0,255	0,190	0,210
800	0,370	0,255	0,285	0,250	0,300	0,210	0,250
900	0,410	0,300	0,285	0,315	0,355	0,250	0,280
1000	0,480	0,340	0,380	0,340	0,405	0,290	0,305

Tabela 3.8 ΔP (kg/cm²) obtidos em função da rotação e da concentração para o anular e propriedades reológicas

Conc (ppm)	0,000	713	1141	1283	1426	1569	1711	1854	1996	2282	2852
100	0,160	0,165	0,030	0,035	0,030	0,015	0,020	0,020	0,020	0,020	0,130
200	0,180	0,185	0,085	0,040	0,055	0,080	0,080	0,050	0,040	0,040	0,160
300	0,210	0,210	0,065	0,090	0,080	0,100	0,090	0,090	0,080	0,065	0,190
400	0,250	0,250	0,110	0,085	0,150	0,100	0,135	0,110	0,145	0,135	0,230
500	0,290	0,285	0,185	0,165	0,200	0,210	0,190	0,170	0,210	0,180	0,285
600	0,340	0,325	0,220	0,235	0,220	0,230	0,225	0,190	0,255	0,195	0,305
700	0,410	0,365	0,255	0,280	0,265	0,285	0,260	0,220	0,270	0,210	0,385
800	0,470	0,380	0,300	0,320	0,330	0,330	0,335	0,220	0,300	0,300	0,400
900	0,515	0,470	0,340	0,370	0,390	0,350	0,400	0,255	0,310	0,335	0,340
1000	0,535	0,500	0,400	0,400	0,380	0,480	0,490	0,310	0,490	0,410	0,350

θ_{nn}	7,9	6,1	12,5	7,9	6,1	11	7	7,9	13,5	7,9	10,5
θ_{nn}	5,5	4	-	5,1	3,9	6,9	5	5	5	5	6,5
θ_{nn}	5	3	5,9	4	3	5,5	3,9	3,9	3,5	3,5	5
θ_{1nn}	4,9	3	5,5	3,5	3	3,1	3,5	3,5	3,1	3,5	4,9
θ_{1nn}	3,9	2,5	4,9	4	2,0	3,5	2,5	2,5	2,5	2,5	3,1
θ_{nn}	3,5	2,4	3,9	3,9	2,0	3,1	2,1	2,5	2,1	2,1	3,5
θ_{nn}	3,2	2,0	2,9	2,1	1,9	2,9	2	2	1,9	2	2,5
θ_{nn}	2,9	1,1	2,5	1,5	1,5	2,1	1,5	1,5	1,1	1,5	2,0
θ_{n}	2,1	2	1,5	1	1	1,1	1	1	1	1	1,5
θ_{n}	2	1	1,1	1	1	1,1	1	1	1	1	1,1
θ_{1n}	1,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1
θ_{1n}	1,5	1	1	1	0,05	1	0	1	1	1	1
Temp (°C)	33,5	31	33,5	28,5	33,5	25,5	25	24	27	27	24,5

Dados Reológicos

Conc (ppm)	3565	4278	4991	5704	7130	8556
100	0,160	0,125	0,150	0,165	0,180	0,200
200	0,170	0,150	0,175	0,140	0,275	0,298
300	0,200	0,185	0,220	0,205	0,200	0,230
400	0,245	0,230	0,250	0,235	0,235	0,260
500	0,265	0,260	0,285	0,270	0,275	0,295
600	0,390	0,320	0,290	0,300	0,330	0,355
700	0,305	0,320	0,325	0,375	0,330	0,380
800	0,240	0,445	0,325	0,410	0,365	0,450
900	0,350	0,370	0,325	0,450	0,465	0,475
1000	0,385	0,390	0,325	0,485	0,500	0,525

θ_{nn}	14,9
θ_{nn}	14
θ_{nn}	7
θ_{1nn}	3,9
θ_{1nn}	4
θ_{nn}	1
θ_{nn}	6
θ_{nn}	3,1
θ_{n}	2,5
θ_{n}	1,9
θ_{1n}	-
θ_{1n}	0,05
Temp (°C)	26,5

CAPÍTULO 4

Tratamento dos Dados Experimentais e Discussão dos Resultados

4.1. Caracterização Reológica dos Fluidos Utilizados

Iniciou-se o processo de tratamento dos dados pela caracterização reológica do fluido em virtude desta ser importante nas etapas subsequentes. Os parâmetros reológicos, obtidos durante o processo de caracterização são necessários para obtenção dos números de Reynolds generalizados. Além disso, as correlações empregadas neste trabalho, no cálculo dos fatores de fricção, são funções do número de Reynolds generalizado.

As curvas reológicas foram obtidas utilizando a metodologia proposta por Yang e Krieger [86], onde os dados fornecidos pelo viscosímetro foram transformados em taxas e tensões de cisalhamento. Além disso, esses dados foram ajustados pelos modelos reológicos de Bingham, Potência, Casson, Herschel-Bulckley e Robertson-Stiff, através do programa **Rheocalc**, desenvolvido por Marques de Sá [43]. Este programa, além de calcular a taxa de cisalhamento, determina a tensão para cada modelo reológico ajustado. Através

da comparação entre os dados ajustados pelos modelos e os experimentais, são fornecidos valores de alguns parâmetros estatísticos que podem auxiliar na escolha do modelo que melhor representa os dados reológicos. Os parâmetros fornecidos, para cada conjunto de dados, são: o desvio padrão, o erro médio, e o índice de correlação. Vale ressaltar que a obtenção de todo esse conjunto de informações requer apenas a entrada do conjunto de pares

de dados: rotação (rpm) e a sua correspondente leitura do dial do viscosímetro Fann, para cada fluido analisado.

A realização dos ajustes dos dados para os modelos reológicos baseou-se na técnica de regressão linear, para a maioria deles. Para os modelos de Bingham, de Potência e de Casson o ajuste foi linear, enquanto que os modelos de Herschel-Bulkley e Robertson-Stiff foram submetidos a um processo de progressão não linear e usando o método numérico de Marquadt[42].

Os dados reológicos para as concentrações de 0; 1284; 1854; 2853; 4280; 5706; 7133 ppm foram processados pelo programa Rheocalc. Baseando-se nos parâmetros estatísticos e na interpretação física dos dados, o modelo reológico que melhor correlacionou a maioria dos fluidos estudados foi o Robertson-Stiff.

O gráfico da figura 4.1 apresenta os dados reológicos e a curva reológica ajustada a partir destes, pelo modelo de Robertson-Stiff para o solvente. A tabela 4.1 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos calculados para os modelos reológicos considerados neste trabalho. O uso conjunto das informações da tabela 4.1 e o reograma com os dados reológicos do solvente possibilitou a escolha do modelo Robertson-Stiff como o que melhor representa esses dados. O mesmo critério foi empregado para a escolha dos modelos reológicos representativos para os fluidos de perfuração contendo as concentrações previamente selecionadas. As tabelas 4.2 a 4.7 apresentam os parâmetros estatísticos dos modelos reológicos, para as concentrações escolhidas. A partir destas dados pode-se concluir que o modelo reológico de Robertson-Stiff foi o de maior frequência de escolha, para as diversas concentrações consideradas, e portanto o mais representativo do conjunto de dados, deste trabalho. As figuras 4.1 a 4.6 apresentam alguns reogramas, para os modelos considerados, a diversas concentrações.

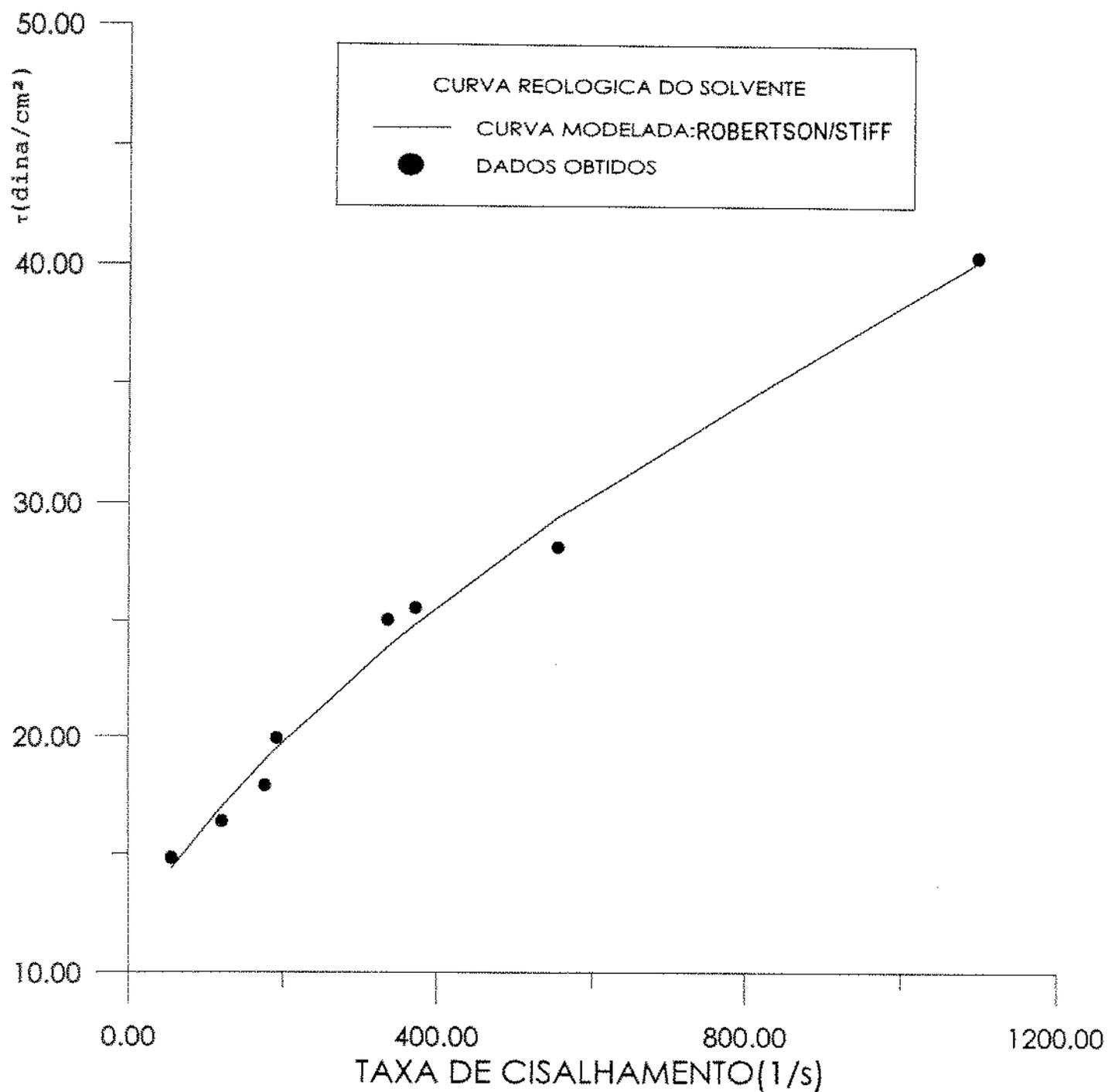


Figura 4.1

Reograma do solvente ajustado pelo modelo Robertson-Stiff

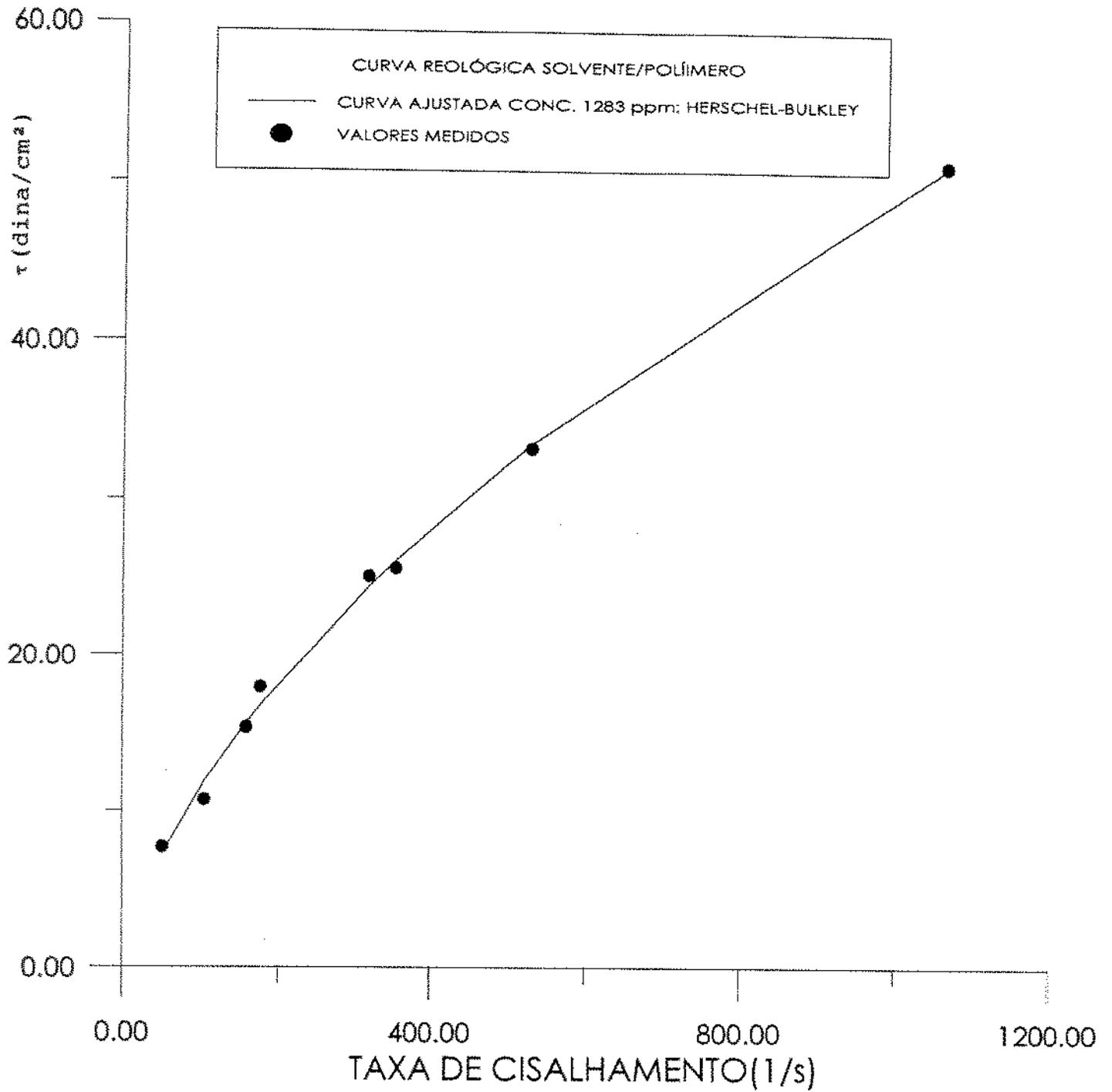


Figura 4.2 Reograma do solvente contendo 1284 ppm de poliacrilamida e ajustada pelo modelo de Herschel-Bulkley

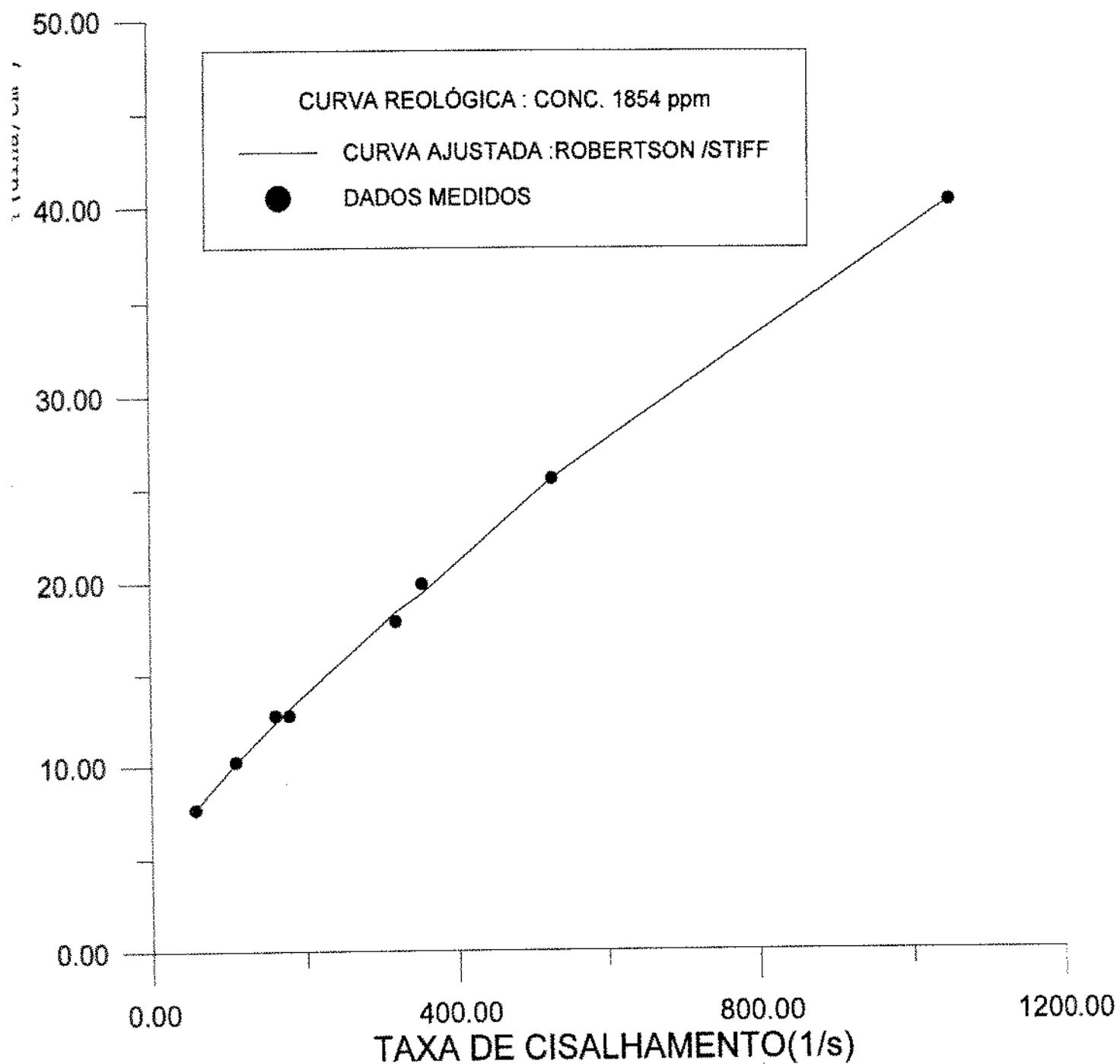


Figura 4.3 Reograma do solvente contendo 1854 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff

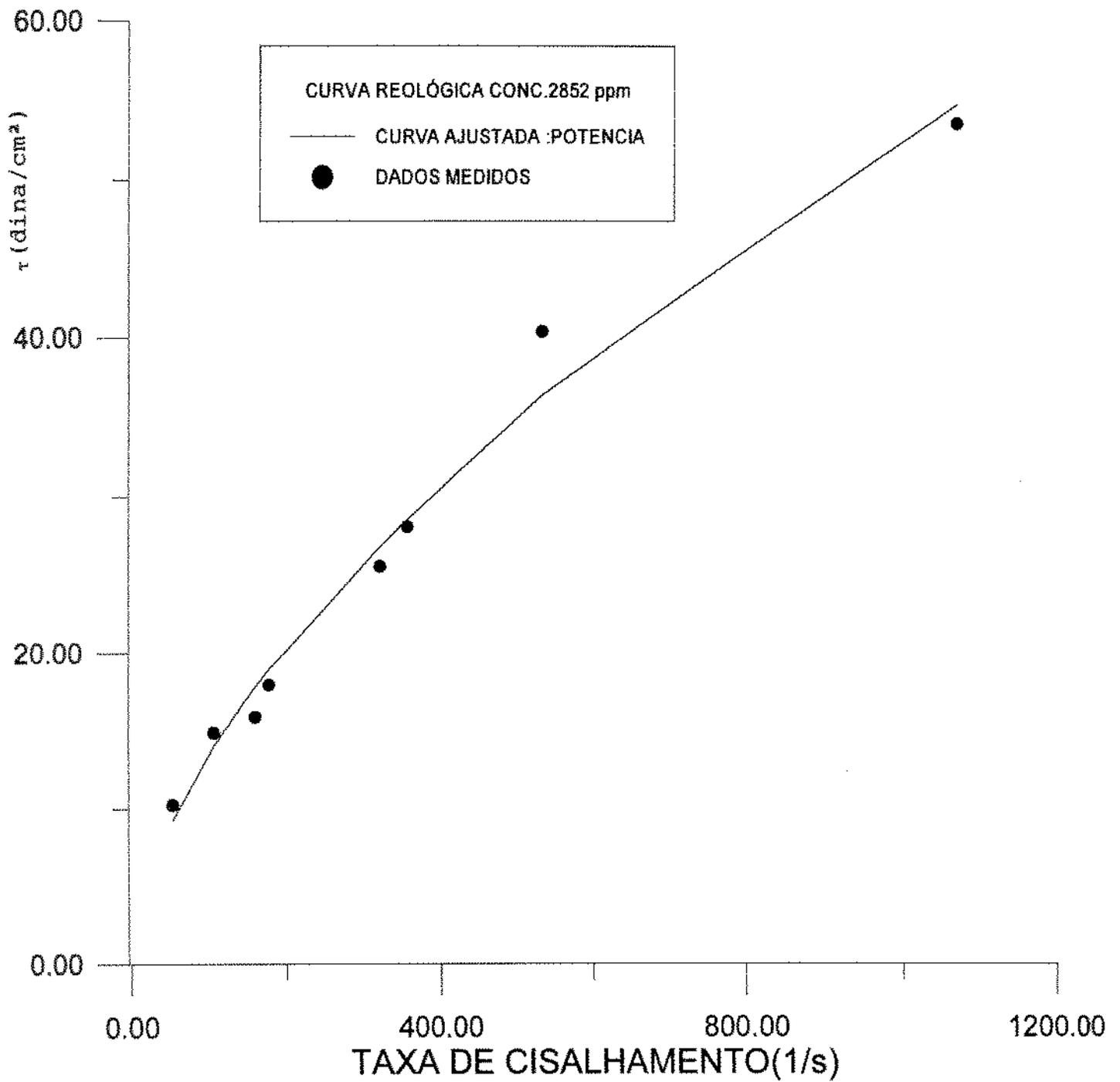


Figura 4.4 Reograma do solvente contendo 2852 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Potência

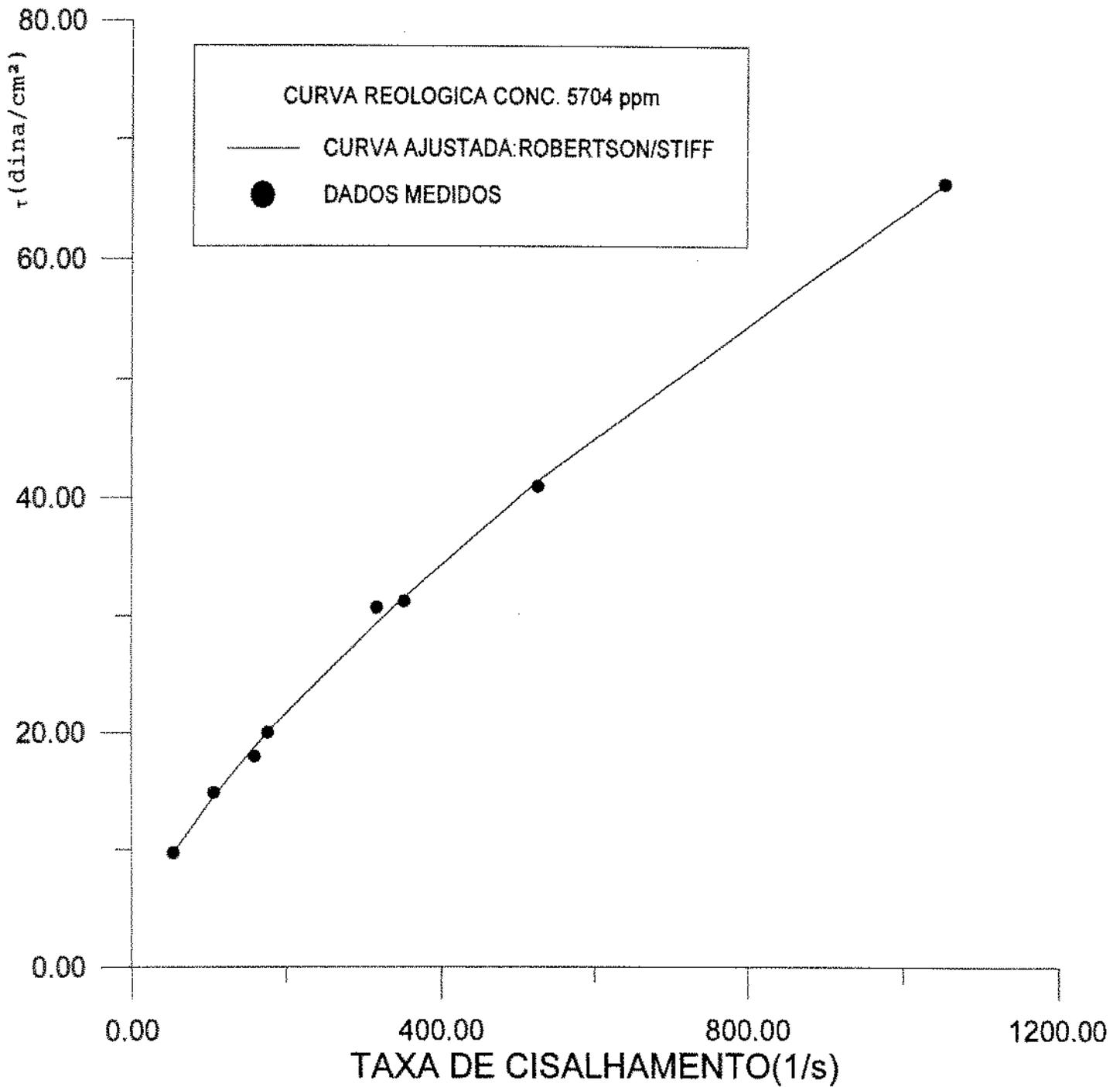


Figura 4.5 Reograma do solvente contendo 5704 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff

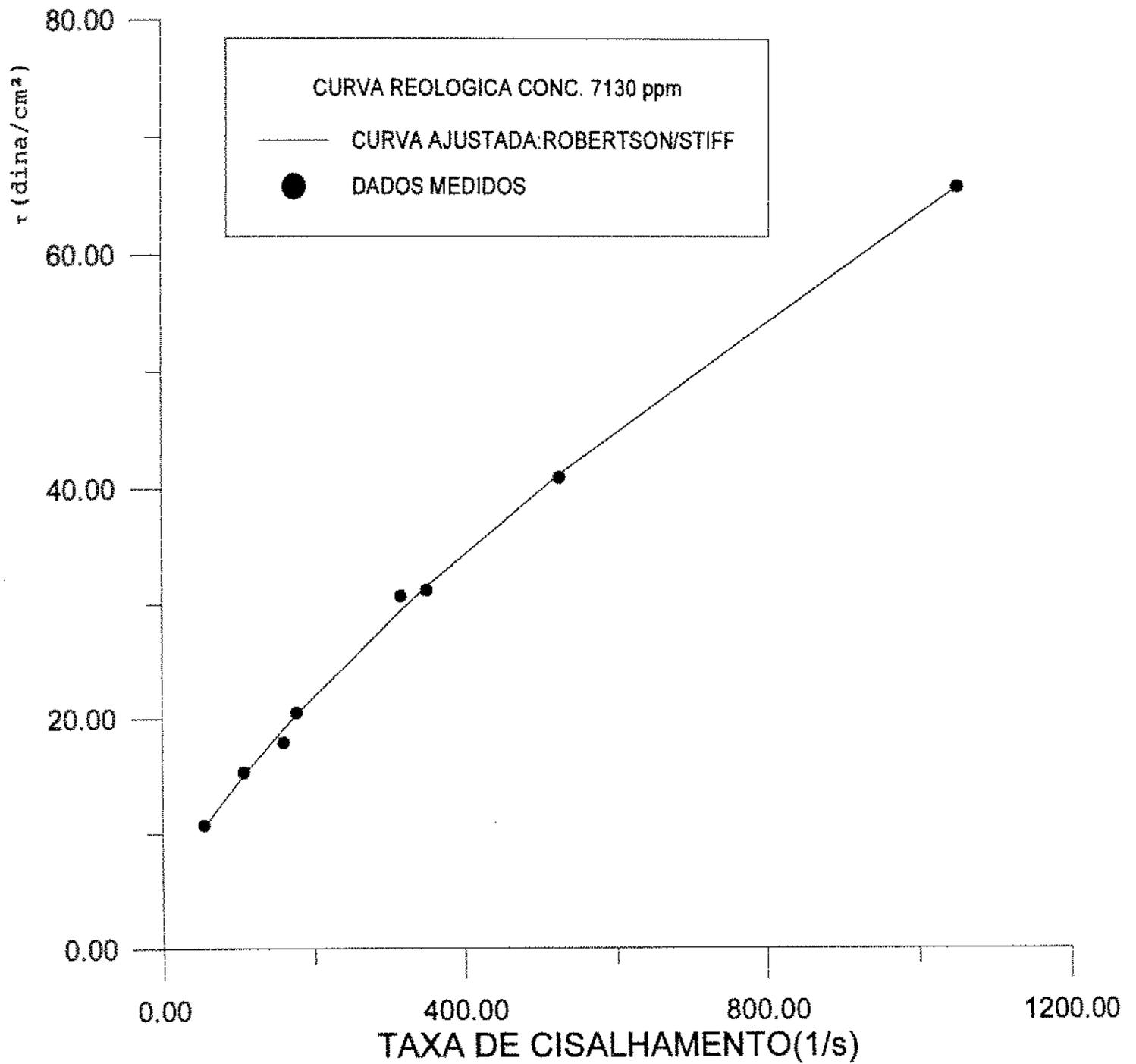


Figura 4.6 Reograma do solvente contendo 7130 ppm de poliacrilamida hidrolisada e ajustada pelo modelo de Robertson-Stiff

Tabela 4.1 Parâmetros estatísticos dos modelos reológicos, para o solvente

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,4237	1,0000	0,9930	0,9941	0,9940
Desvio Padrão	7,5278	1,3112	0,8995	0,8941	0,9049
Erro Médio	0,0000	0,0545	-0,0027	0,0000	0,0000

Tabela 4.2 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 1284 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,9872	0,9927	0,9818	0,9983	0,9986
Desvio Padrão	2,1534	0,7927	1,6096	0,7252	0,7195
Erro Médio	0,0000	-0,0417	-0,0838	-0,0026	0,5785

Tabela 4.3 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 1854 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,4509	0,9436	0,9983	0,9995	0,9995
Desvio Padrão	9,4366	1,2158	0,3513	0,3091	0,3138
Erro Médio	0,0000	-0,3748	0,0058	0,00017	0,0000

Tabela 4.4 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 2853 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,4286	0,9904	0,9760	0,9890	0,9913
Desvio Padrão	13,3136	1,9272	2,4292	1,9340	1,9327
Erro Médio	0,0000	-0,0067	-0,0743	-0,0167	0,0000

Tabela 4.5 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 4280 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,9197	1,0000	0,9069	1,0000	1,0000
Desvio Padrão	10,2462	10,0155	9,6047	9,5196	12,6161
Erro Médio	0,0000	-0,0141	-0,3684	0,3242	-8,2501

Tabela 4.6 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 5706 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,4338	1,0000	1,0000	0,9993	0,9993
Desvio Padrão	16,4405	0,7194	0,4775	0,6329	0,6339
Erro Médio	0,0000	0,0508	0,0075	-0,000090	0,0000

Tabela 4.7 Parâmetro estatístico para o solvente contendo 7133 ppm de poliacrilamida hidrolisada

Modelo Reológico	Bingham	Power Law	Casson	Stiff-Robertson	Herschel-Bulkley
Índice de Correlação	0,4281	1,0000	0,9942	0,9991	0,9992
Desvio Padrão	16,1333	0,8244	0,9720	0,6893	0,6977
Erro Médio	0,0000	0,0891	-0,0405	-0,0010	0,0000

A figura 4.7 permite se ter uma idéia da influência da concentração da poliacrilamida hidrolisada no solvente. Pode-se notar que à medida que se eleva a concentração as tensões cisalhantes são maiores. Entretanto, ocorreu um comportamento inverso para as duas maiores concentrações utilizadas.

A figura 4.8 ilustra a degradação sofrida pelo polímero presente no solvente. Foram feitas medidas das propriedades reológicas, à varias taxas de cisalhamentos, para o solvente contendo 1426 ppm de poliacrilamida hidrolisada, antes e após a conclusão de testes de Δp versus vazão volumétrica. Em seguida, plotou-se os dados obtidos resultando na figura 4.8. Pela figura, observa-se uma queda na tensão de cisalhamento, em relação aos valores obtidos com o fluido recém-preparado, para o fluido empregado nos testes (para uma mesma taxa de cisalhamento). Com isso se pode constatar o processo de degradação sofrido pelo polímero presente no fluido.

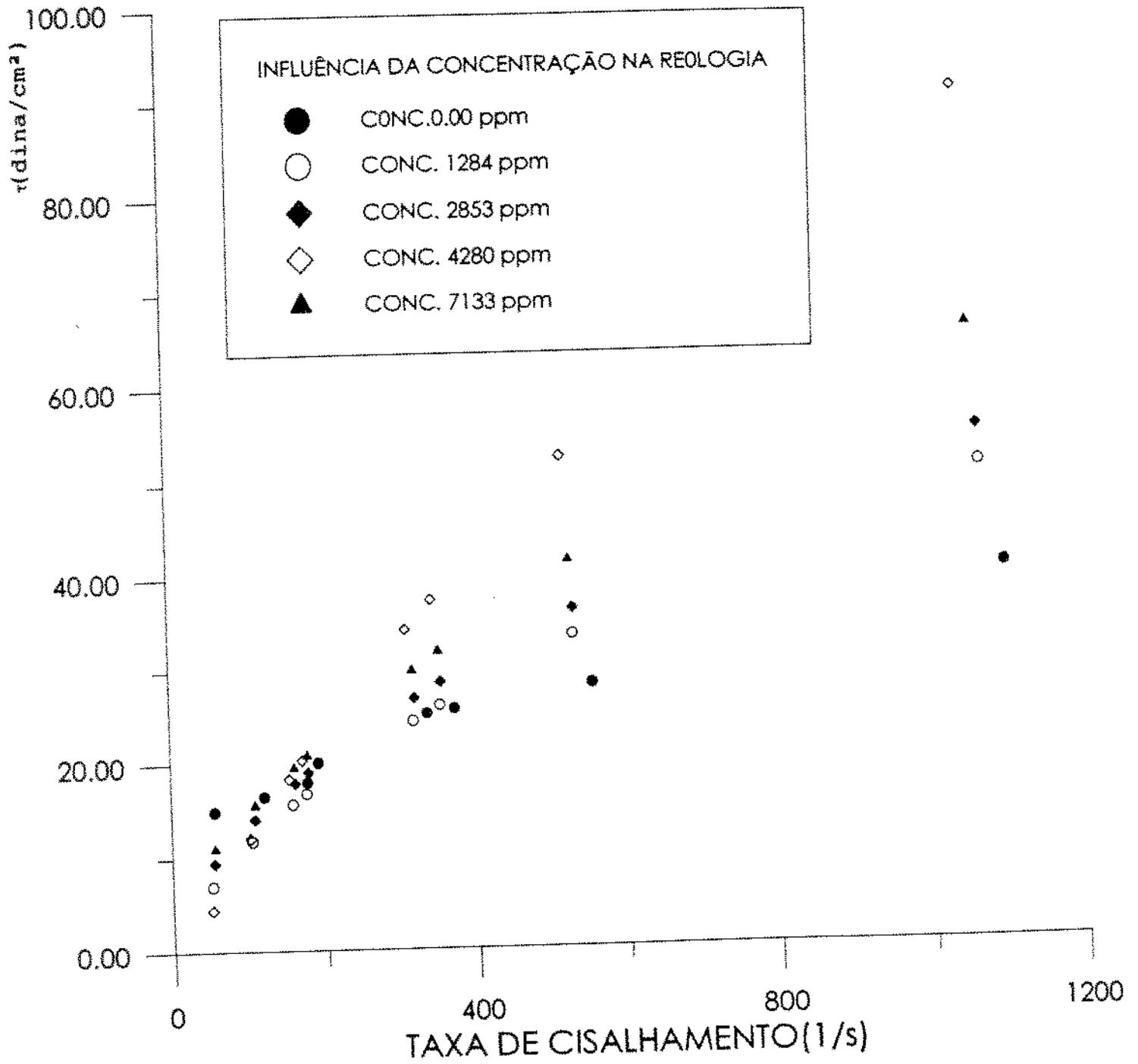


Figura 4.7 Influência da concentração de poliacrilamida hidrolisada na reologia do solvente

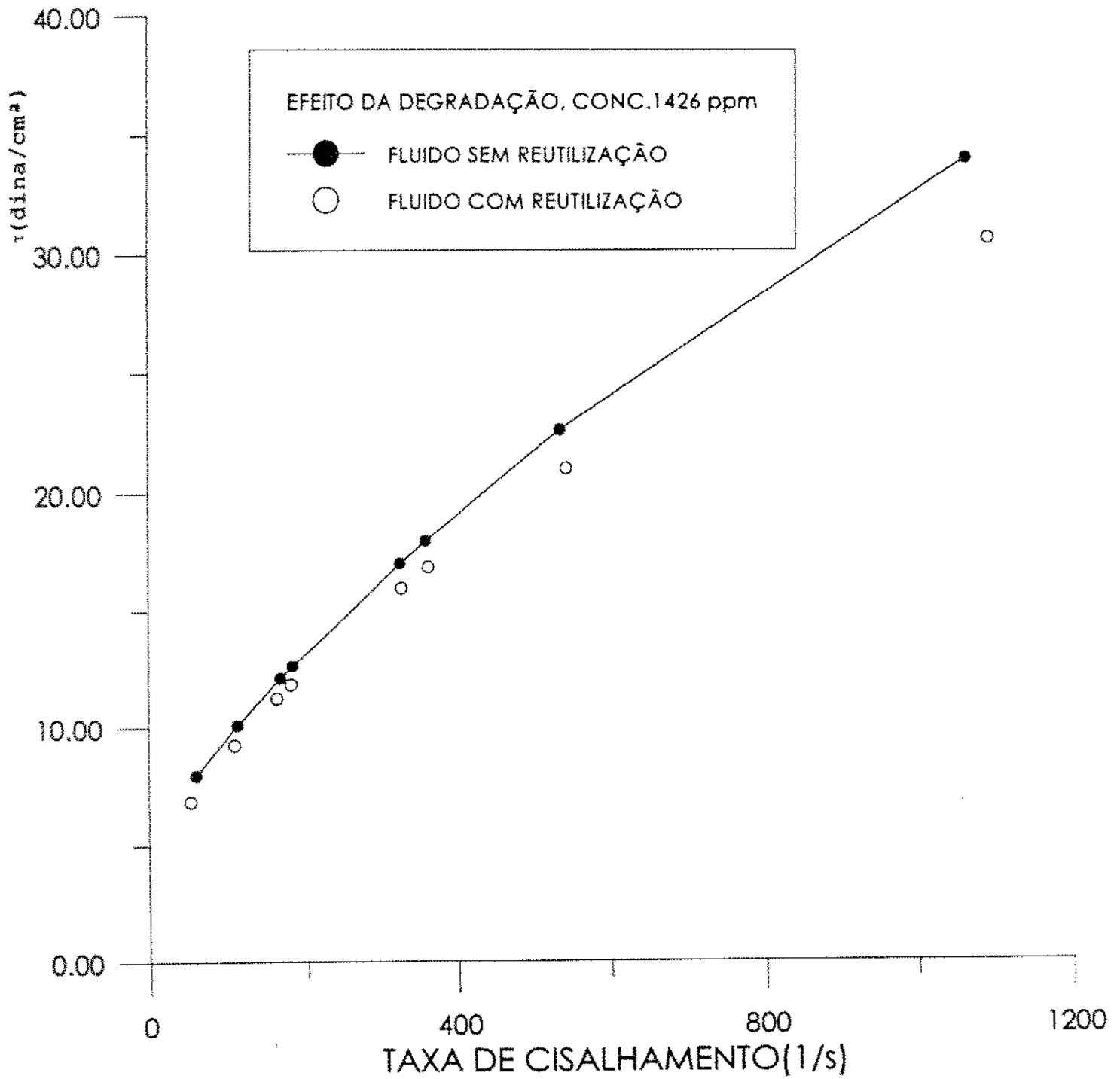


Figura 4.8 Efeito da degradação no solvente contendo 1426 ppm de poliacrilamida hidrolisada

4.2. Número de Reynolds Generalizado

A escolha do modelo reológico de Robertson-Stiff como aquele que melhor ajusta os dados reológicos deste trabalho, possibilitou também a escolha da metodologia de cálculo tanto para a geometria tubular quanto para a anular. Para isso foram escolhidas as expressões do número de Reynolds generalizado, desenvolvidas por Paixão[53], e que são representadas nas expressões (2.44) e (2.45) para as geometrias tubular e anular, respectivamente.

4.3. Cálculo dos Fatores de Fricção

4.3.1. Fatores de Fricção nos Tubos

Como primeira etapa, foram calculados os valores das velocidades médias para cada tubo, para cada vazão utilizada nos experimentos.

A seguir calculou-se os valores de tensões cisalhantes para o fluido, segundo a relação:

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L} \quad (4.1)$$

onde:

- D é o diâmetro interno do tubo, obtido experimentalmente,
- ΔP é o diferencial de pressão medido experimentalmente e,
- L é o comprimento do tubo, onde mediu-se o diferencial de pressão.

O cálculo dos fatores de fricção foi feito a partir da equação (4.2):

$$f = \frac{\tau_w}{\rho \bar{V}^2 / 2} \quad (4.2)$$

onde:

- τ_w é a tensão cisalhante de parede,
- ρ é a massa específica do fluido de perfuração,

• \bar{V} é a velocidade média no tubo.

Nos gráficos de fator de fricção versus o número de Reynolds do solvente, também foi incluída a curva a partir da equação (2.43), de Ataíde[2], visando uma comparação com os resultados obtidos neste trabalho, para a geometria tubular.

4.3.2. Fatores de Fricção no Anular

Inicialmente calculou-se a velocidade média no espaço anular através da relação:

$$\bar{V}_{AN} = \frac{4Q}{\pi(D_e^2 - D_i^2)} \quad (4.3)$$

onde:

- Q é a vazão medida experimentalmente,
- D_e é o diâmetro interno do tubo de 7,62 cm,
- D_i é o diâmetro externo do tubo de 5,08 cm.

Em seguida calculou-se a tensão de cisalhamento e o fator de fricção usando as relações (4.1) e (4.2).

Nos gráficos de fator de fricção versus o número de Reynolds do solvente foi incluída a curva obtida com a equação (2.49), desenvolvida por Paixão[53] para escoamentos turbulentos anulares com fluidos de perfuração. Esta correlação foi usada visando uma comparação com os resultados obtidos neste trabalho, para a geometria anular.

4.4. Quantificação do Percentual de Redução de Fricção

Neste trabalho foi utilizada a relação (2.4), de Ting e Kim[75] para o cálculo do percentual de redução de fricção, embora o uso das expressões de Burger[12] et alii e de Virk[79] levem aos mesmos resultados.

4.5. Programas Computacionais Usados no Tratamento de Dados

Os cálculos conduzidos durante essa etapa foram realizados por um conjunto de programas computacionais conforme relacionados abaixo:

- RHEOCALC**: permitiu o cálculo das taxas e tensões de cisalhamento dos dados, além de ajustar esses dados pelos modelos reológicos anteriormente mencionados. Além disso, para cada modelagem o programa forneceu os parâmetros estatísticos : desvio padrão, erro médio e o índice de correlação.
- GLOBO**: permitiu os cálculos dos números de Reynolds generalizados, da tensão cisalhante de parede (τ_w), do fator de fricção e do percentual de redução de arraste para os tubos de 2,54 e 3,18 cm. No Apêndice B apresenta-se cópia do programa, desenvolvido em linguagem C.
- GLOBOAN**: realizou os cálculos dos números de Reynolds generalizados, da tensão cisalhante de parede (τ_w), fator de fricção e percentual de redução de arraste para o escoamento do anular 7,62/5,08 cm. O programa foi desenvolvido em linguagem C e encontra-se cópia do mesmo no Apêndice B.
- AJUSTE**: esse programa permitiu o ajuste estatístico das curvas $Re_{RS}^* \times f$, para o solvente, tanto para os tubos quanto para o anular.
- ATAÍDE**: permitiu os cálculos dos fatores de fricção de Ataíde[2] para os tubos de 2,54 cm e 3,18 cm, respectivamente, de acordo com a equação (2.41).
- PAIXÃO**: permitiu os cálculos dos fatores de fricção de Paixão[53], de acordo com a equação (2.48).

4.6. Discussão dos Resultados

Antes de iniciar esse estágio, vale ressaltar algumas considerações :

- O fluido de perfuração, usado neste trabalho, é uma suspensão aquosa a base de argilas e cloreto de sódio, além de outros produtos químicos. A formulação aqui usada seguiu o padrão usual para fluido de perfuração, na indústria de petróleo.

- Neste trabalho o fluido de perfuração foi considerado o solvente, nos gráficos onde foi estudada a redução de fricção. Isto porque, na literatura que trata do assunto, estabeleceu-se a redução do atrito em relação à substância pura, que é chamada solvente e que é normalmente água. Dessa forma, para estudar, por exemplo, a redução de atrito em uma solução aquosa de carboxi-metil-celulose, é comum utilizar-se um gráfico fator de atrito-número de Reynolds da água (chamado número de Reynolds do solvente) e nesse mesmo gráfico colocar os pontos da solução com polímero. Essa forma de tratamento dos dados permite a visualização do fenômeno e sua quantificação.

Não foi encontrado na literatura nenhum estudo sobre redução de fricção com adições de polímero onde o fluido base fosse fluido de perfuração. Esse é um estudo pioneiro em que a redução de arraste é estudada em relação ao fluido de perfuração, que é um fluido não Newtoniano.

4.6.1. Escoamento do Fluido de Perfuração no Tubo de 2,54 cm

Através das figuras 4.9 a 4.16 é possível se ter uma visão qualitativa da ocorrência do fenômeno de redução de arraste para o tubo de 2,54 cm, contendo diferentes concentrações de poliacrilamina hidrolisada. Pode-se perceber que as concentrações de 1141 e 1284 ppm apresentaram maiores quedas nos fatores de fricção. Além disso, observou-se que para as concentrações intermediárias (1854 a 4280 ppm), as reduções de fricção foram ligeiramente menores que para as concentrações baixas (713 a 1712 ppm). Finalmente, para concentrações elevadas (maiores que 4280 ppm), o fenômeno quase não existiu, ou seja, foi pouco

representativo. As figuras 4.15 e 4.16 permitem se ter uma visão qualitativa dos conjuntos de dados. Além disso, permite a observação da tendência de queda da redução de fricção à medida que eleva-se a sua concentração (no solvente), para a faixa de número de **Reynolds** considerado. Por outro lado, nas figuras 4.9 a 4.14, existem duas curvas e pontos experimentais, onde a curva do alto foi obtida a partir da equação (2.41), desenvolvida por Ataíde[2]. Mais abaixo, na figura, encontra-se a curva obtida a partir do ajuste de dados experimentais do solvente. A seguir é apresentada a expressão, tipo Blasius, obtida neste trabalho para esta curva:

$$f = \frac{0,346}{(Re_{RS})^{0,383}} \quad (4.4)$$

cuja validade é:

- Para suspensões argilosas, como fluido de perfuração inibidos com sal NaCl;
- Para escoamento em tubo de 2,54 cm;
- Para escoamento com número de Reynolds entre 19000 e 170000.

Por outro, as figuras 4.15 e 4.16 permitem se ter uma visão qualitativa dos conjuntos de dados. Além disso, permite a observação da tendência de queda da redução de fricção à medida que eleva-se a sua concentração (no solvente), para a faixa de número de **Reynolds** considerado.

Na figura 4.9 pode-se observar a curva de Ataíde e aquela obtida pelo ajuste de dados do solvente. A distância entre essas curvas, deve-se às diferenças nas composições dos fluidos usados nos respectivos modelos. Para a correlação de Ataíde[2], empregou-se suspensões à base de caulim, argila e bauxita, enquanto a correlação (4.4) foi desenvolvida a partir de uma suspensão a base de argila e água salgada. Essa diversificação, nos fluidos usados por Ataíde[2] e nesse trabalho, resulta em diferenças nas propriedades reológicas, que por sua vez levam a valores distintos para as constantes das correlações (2.41) e (4.4). Conclui-se, portanto, que estas constantes são funções das propriedades reológicas dos fluidos.

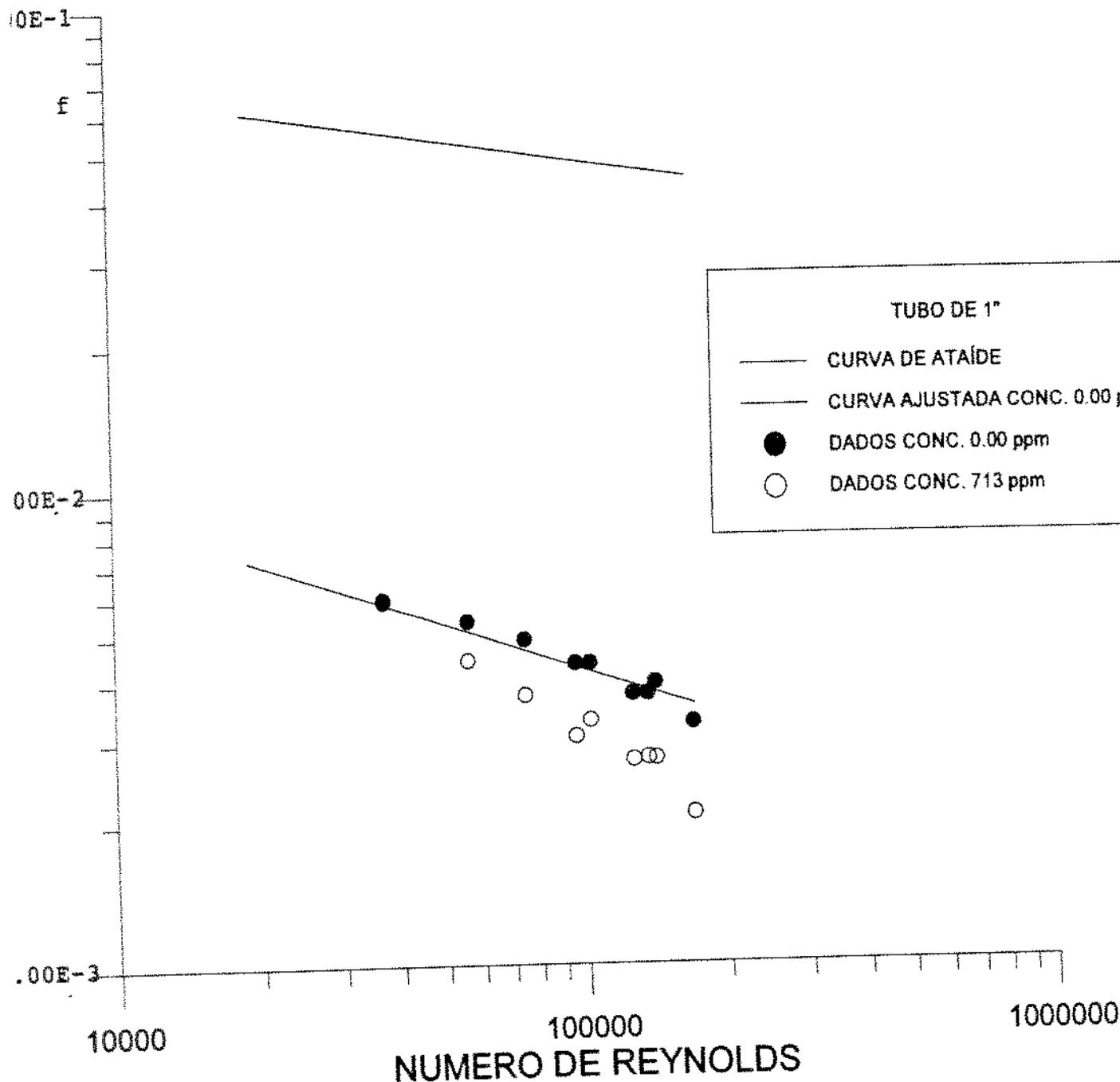


Figura 4.9 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada e dados experimentais para o solvente, dados experimentais para a concentração de 713 ppm e curva de Ataíde, usando o tubo de 1" (2,54 cm)

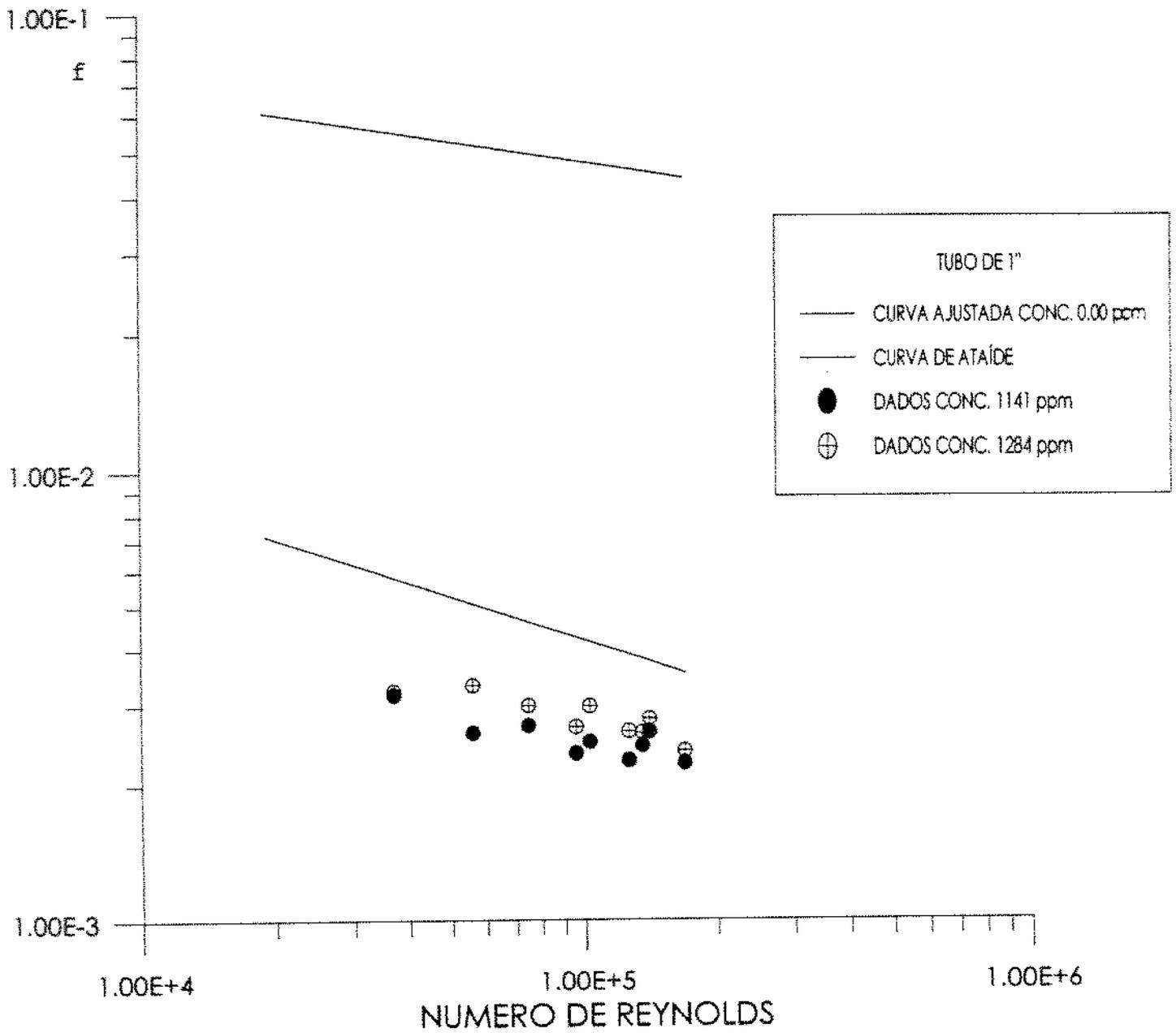


Figura 4.10 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1141 ppm e 1284 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)

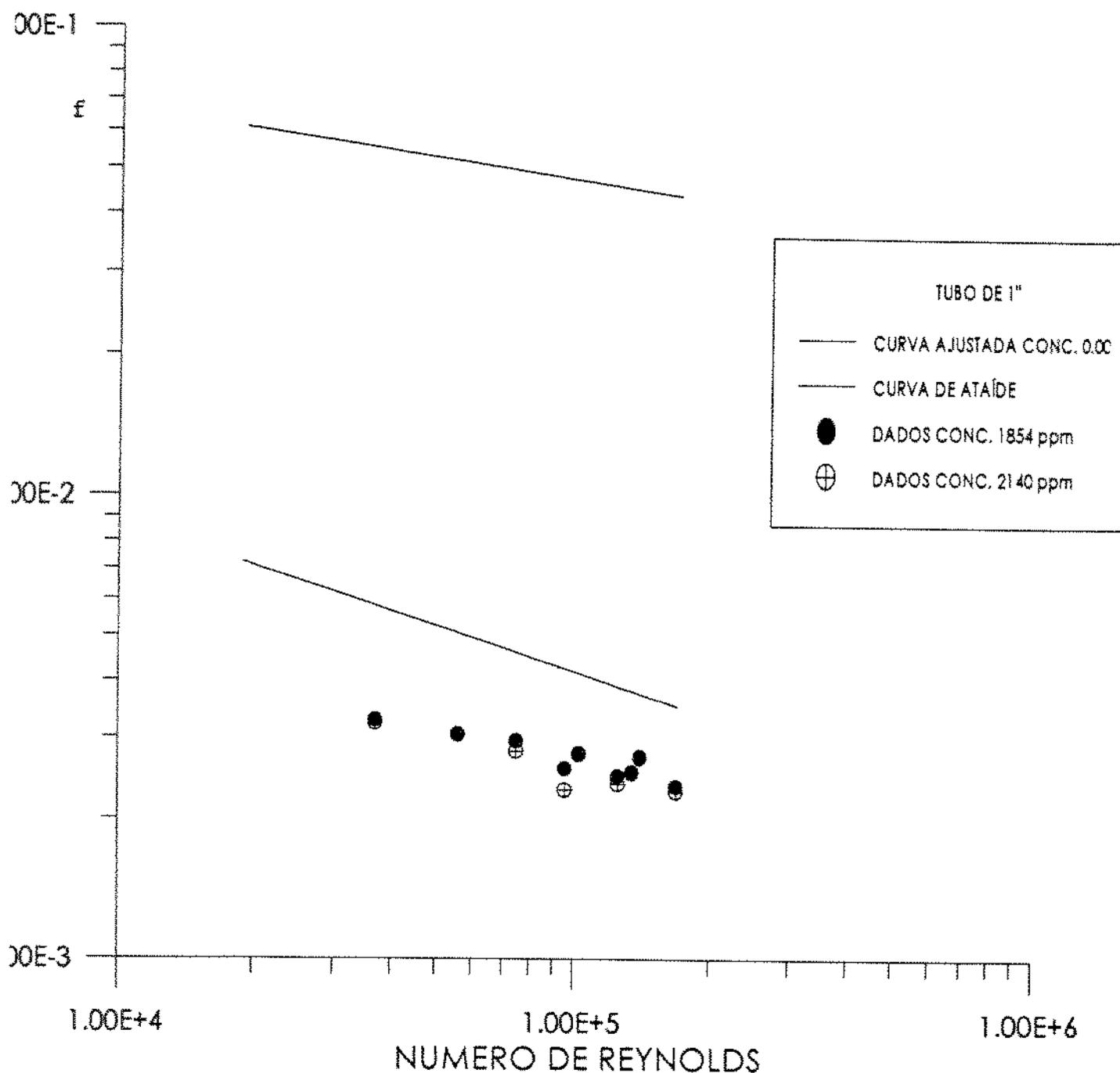


Figura 4.11 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1854 ppm e 2140 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)

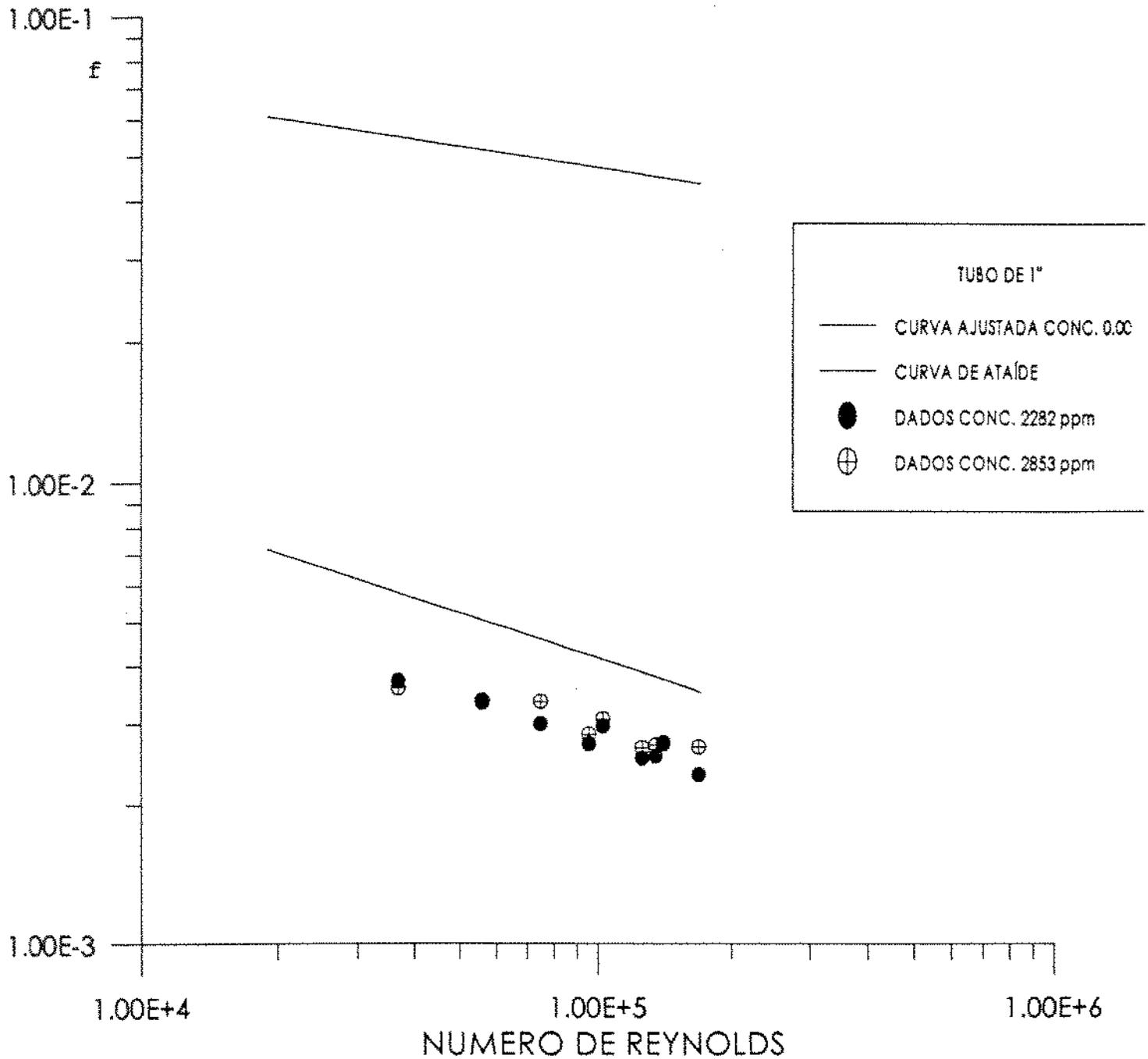


Figura 4.12 Gráfico $f \times Re_{RS}^{-1}$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2282 ppm e 2853 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)

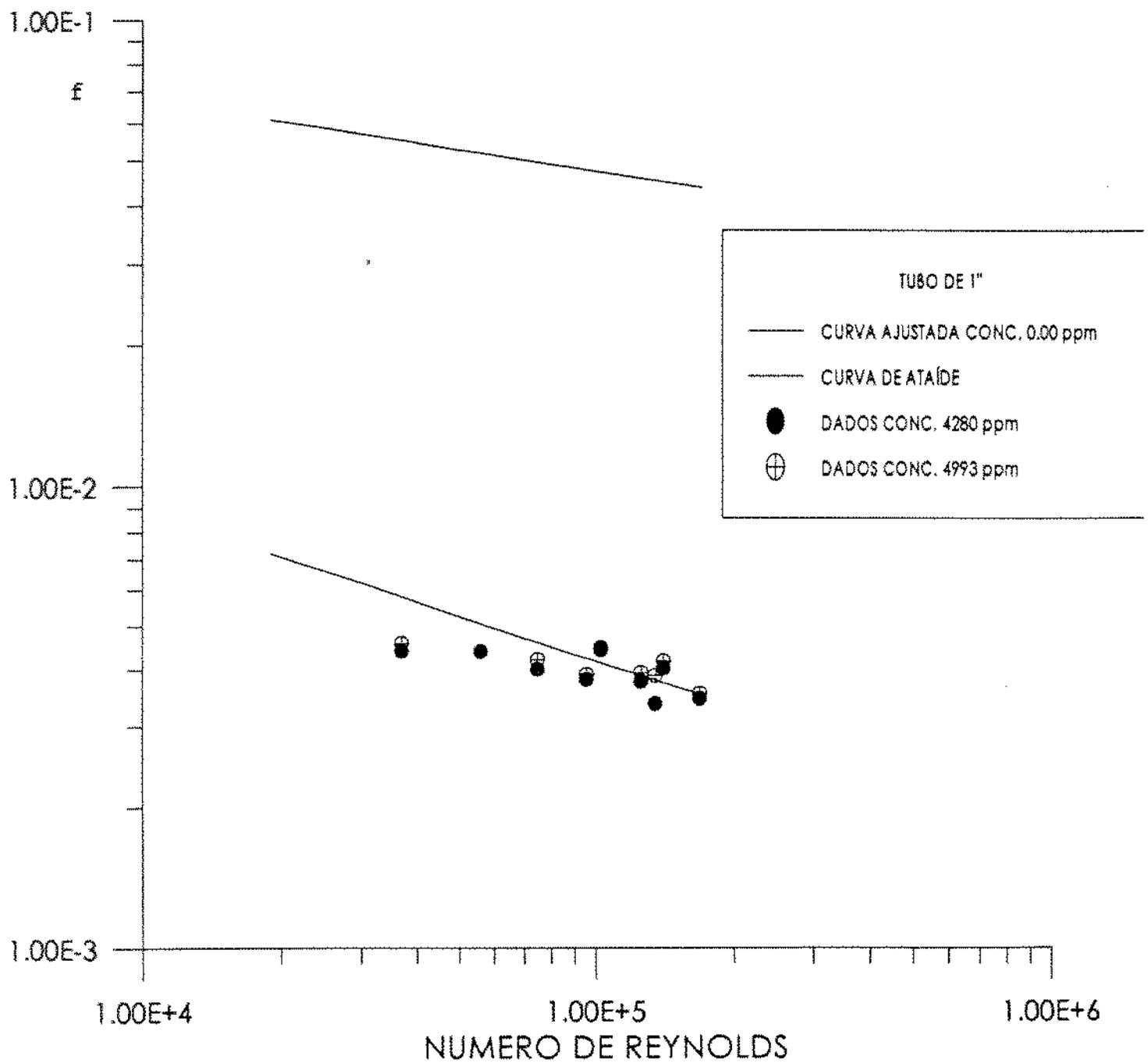


Figura 4.13 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 4280 ppm e 4993 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)

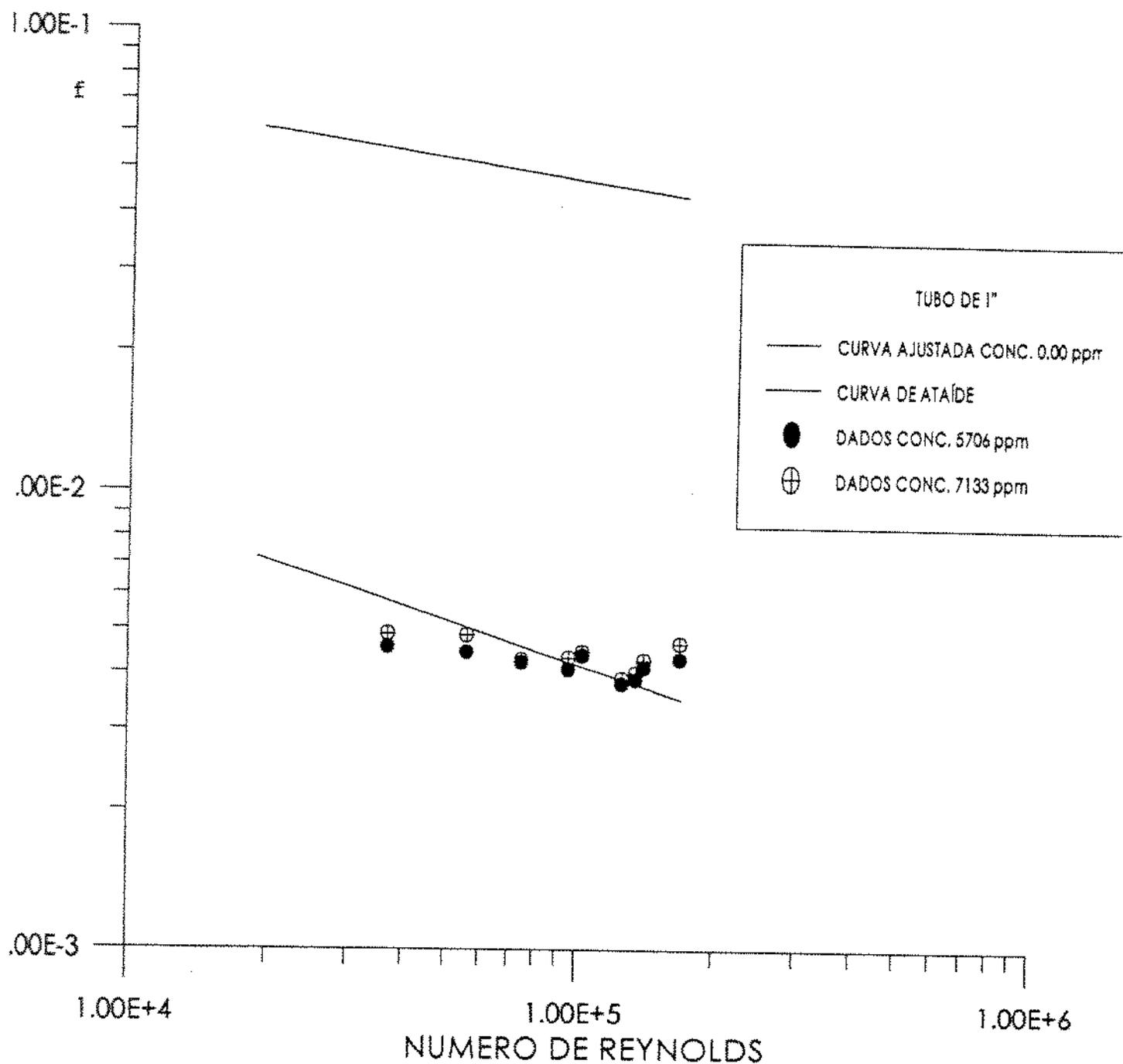


Figura 4.14 Gráfico $f \times Re_{RS}^{-1}$: curva ajustada para o solvente, curva de Atáide e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 5706 ppm e 7133 ppm, respectivamente, usando tubo de 1" (2,54 cm)

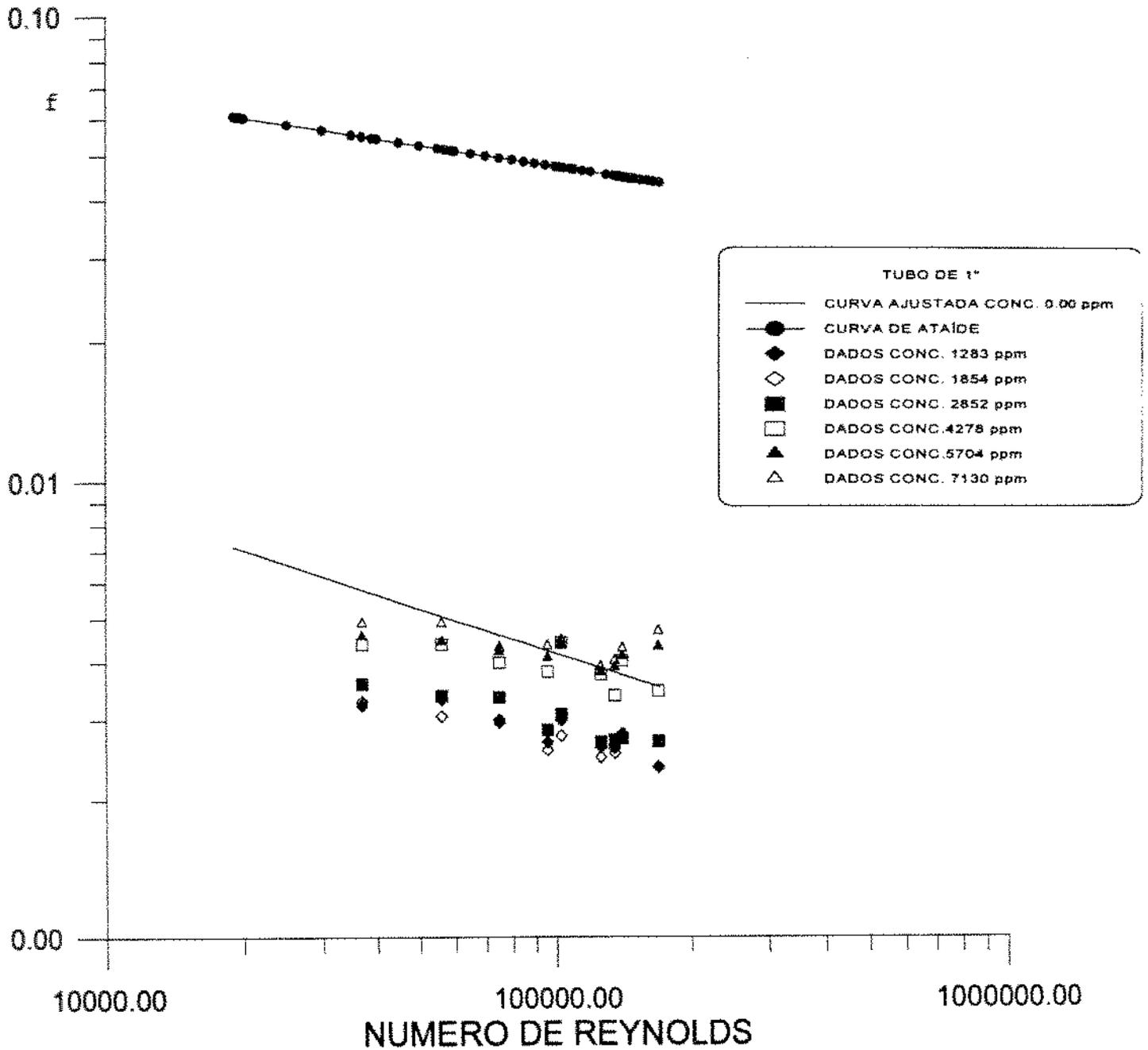


Figura 4.15 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva de Ataíde, curva ajustada e dados experimentais para as concentrações escolhidas para análise, usando tubo de 1" (2,54 cm)

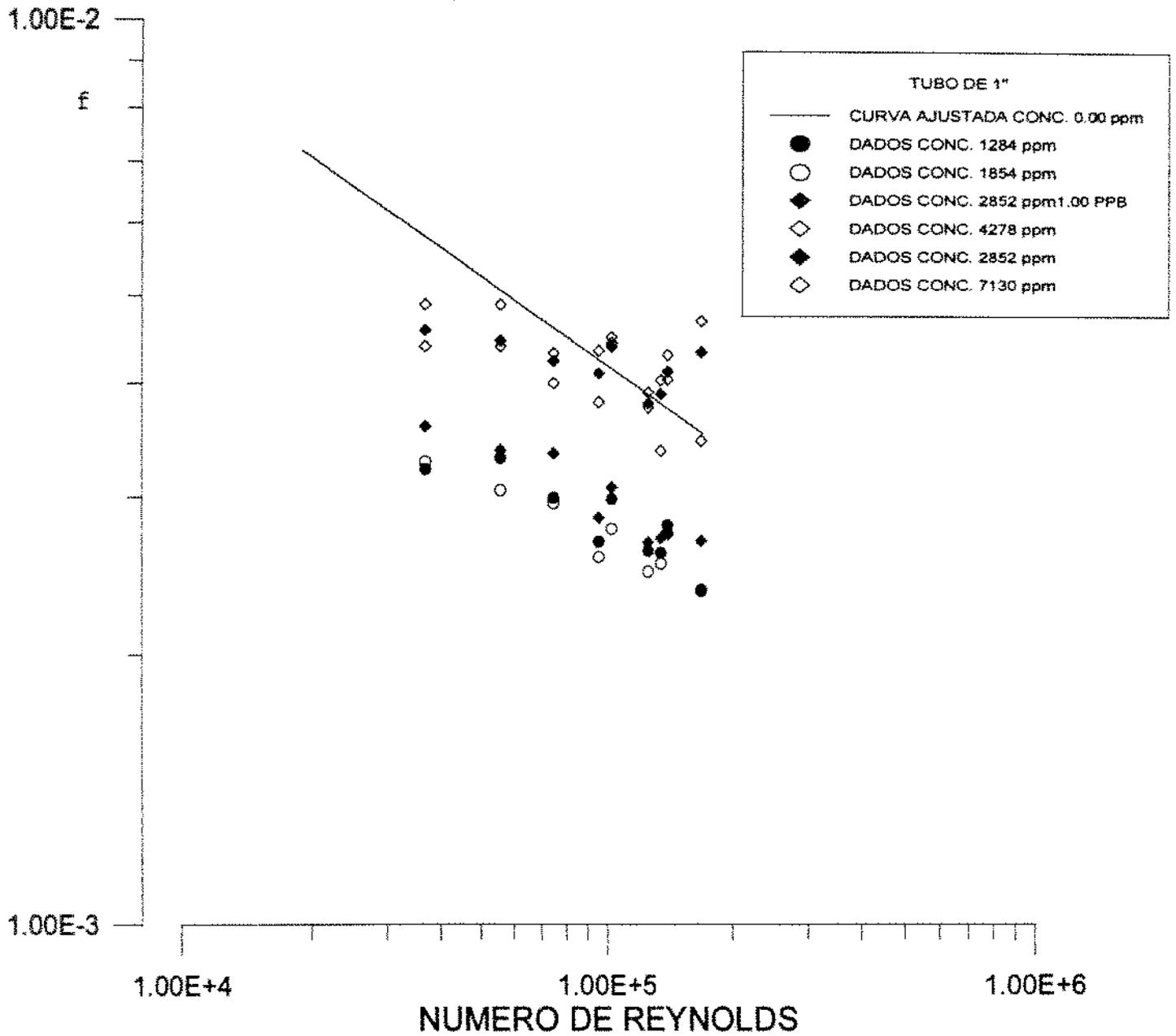


Figura 4.16 Gráfico $f \times Re_{RS}$: curva ajustada para o solvente contendo dados experimentais para as concentrações escolhidas, usando tubo de 1" (2,54 cm)

A partir da tabela 4.8 e das figuras 4.17 a 4.22 é possível ter-se uma idéia quantitativa do fenômeno de redução de fricção e também pode-se observar algumas tendências:

1. Quando é mantido o escoamento num definido número de Reynolds e então varia-se a concentração de poliacrilamida hidrolisada no solvente, observa-se que este produto atua como agente redutor de fricção para concentrações entre 713 e 2853 ppm, sendo que os maiores valores de redução de fricção são alcançados entre as concentrações 1141 e 1284 ppm. Para concentrações superiores a 2853 ppm, a poliacrilamida hidrolisada vai perdendo gradualmente sua função redutora, como se observa na tabela 4.8.

2. Para uma dada concentração, observa-se um crescimento nos percentuais de redução para valores do número de Reynolds mais baixos, e a valores de Reynolds intermediários ocorreu uma estabilização nos índices com valores próximos dos máximos alcançados. E, finalmente, para valores do número de Reynolds muito elevados, ocorreu uma queda, seguida de uma estabilização nos percentuais. De acordo com a literatura citada por [84] envolvendo soluções aquosas poliméricas, quanto maior o número de Reynolds, maior a redução de fricção esperada. O comportamento contrário aqui observado foi interpretado como possível ocorrência de degradação do polímero, para os altos números de Reynolds. Para suspensões em geral, os agentes degradantes podem ser identificados como :

- tensões cisalhantes de parede e,
- nesse caso, interação com as partículas de argila

As tensões cisalhantes de parede crescem com o aumento do número de Reynolds e com a redução do diâmetro. Nesse estudo observou-se que a medida que aumentou-se o número de Reynolds, as tensões cisalhantes de parede alcançaram níveis que podem ter levado a uma ação degradativa das cadeias moleculares da poliacrilamida hidrolisada, presente no solvente.

Quando a argila é colocada em meio aquoso, há inicialmente um processo de hidratação de suas partículas. Após algum tempo, as moléculas de água penetram entre as lâminas, que no conjunto originam a molécula de argila, até que ocorra dispersão dessas lâminas no meio

aquoso, aumentando assim a área de superfície argilosa exposta ao meio. Então, relativo a este trabalho, uma parte do polímero contido na suspensão é absorvida pelas superfícies das lâminas de argila, diminuindo a quantidade disponível para atuar como redutor de fricção. Além disso, as lâminas dispersas em contato com o polímero a altas taxas de cisalhamento tendem a romper suas longas cadeias lineares e portanto gerar uma degradação. Assim, a queda do percentual de redução à medida que aumenta-se o número de Reynolds (para determinada concentração) é resultante do efeito sinérgico entre as tensões cisalhantes de parede e a ação das argilas presentes nas suspensões utilizadas.

Tabela 4.8 Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de Reynolds generalizado, tubo de 2,54 cm

Nº de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)						
	713	1141	1284	1369	1712	1854	2140
56056	17,28	51,23	37,65	37,65	37,65	42,59	42,59
74916	23,34	44,48	38,31	34,84	37,88	39,18	42,22
95953	29,77	45,82	38,13	36,45	39,13	40,47	46,49
103912	24,02	42,64	30,93	31,23	30,93	36,04	33,74
126021	27,44	39,49	29,74	31,79	32,05	33,33	35,90
135407	28,83	34,86	30,28	28,90	30,96	32,11	32,57
140689	30,80	33,47	28,95	26,49	29,57	30,39	30,80
169029	33,85	31,32	26,79	23,02	26,79	26,98	29,06

Nº de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)					
	2882	2853	4280	4993	5706	7133
56056	37,84	36,42	17,28	17,28	16,95	8,02
74916	38,31	30,93	17,46	13,12	12,68	10,95
95953	37,12	34,13	11,71	9,36	5,02	-0,67
103012	31,23	28,83	-2,70	-4,20	-1,80	-4,20
126021	31,79	28,21	-1,28	-6,15	-2,31	-5,13
135407	31,51	27,52	9,40	-4,59	-4,59	-8,26
140689	30,18	30,60	-2,92	-6,78	-3,13	-9,65
169020	27,92	16,98	-7,17	-10,60	-34,34	-45,28

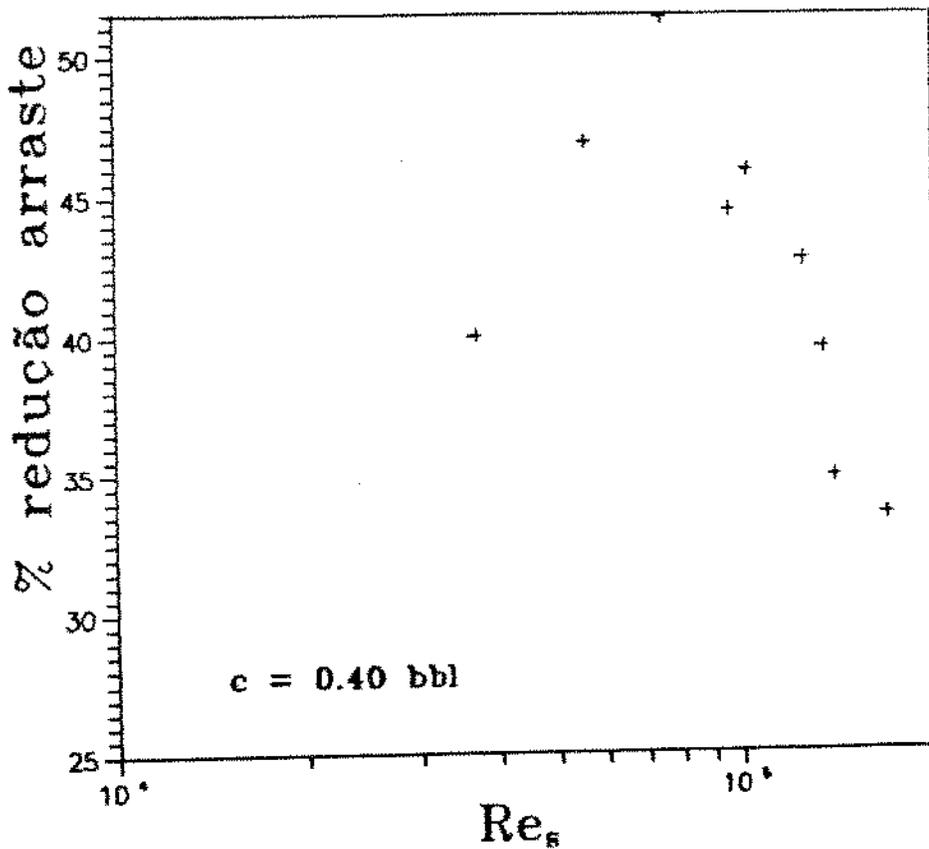


Figura 4.17 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1141 ppm

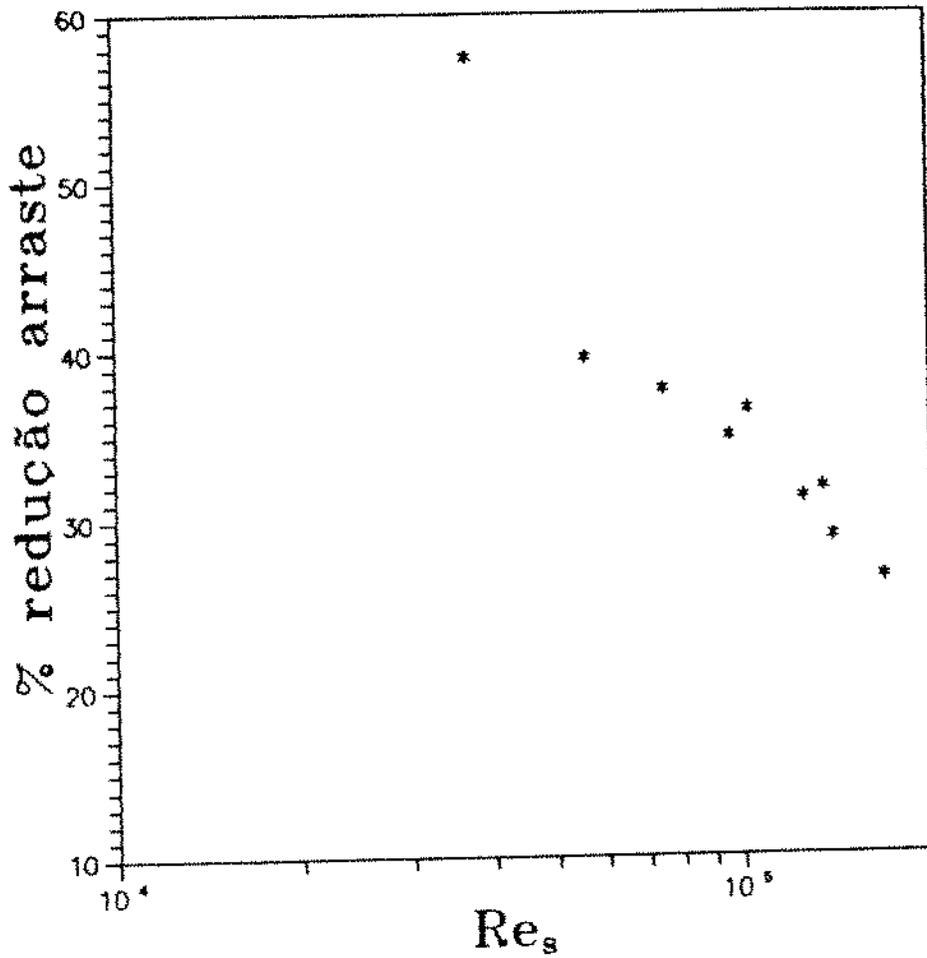


Figura 4.18 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1283 ppm

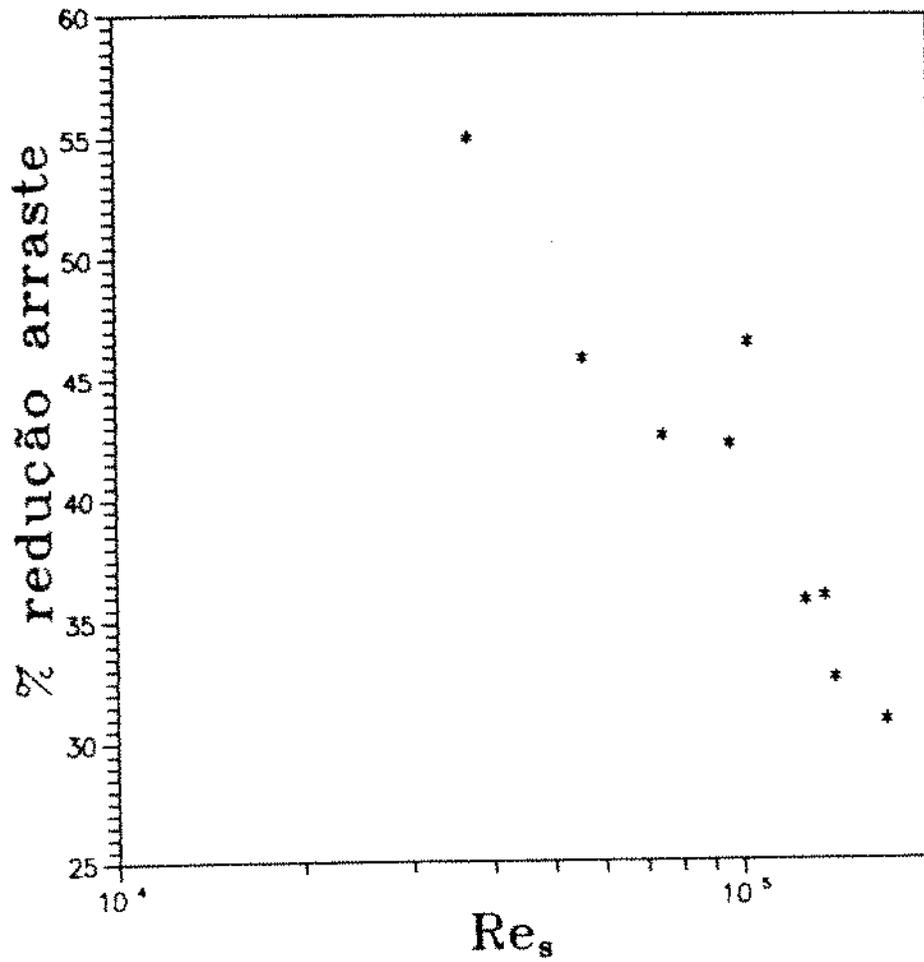


Figura 4.19 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 1854 ppm

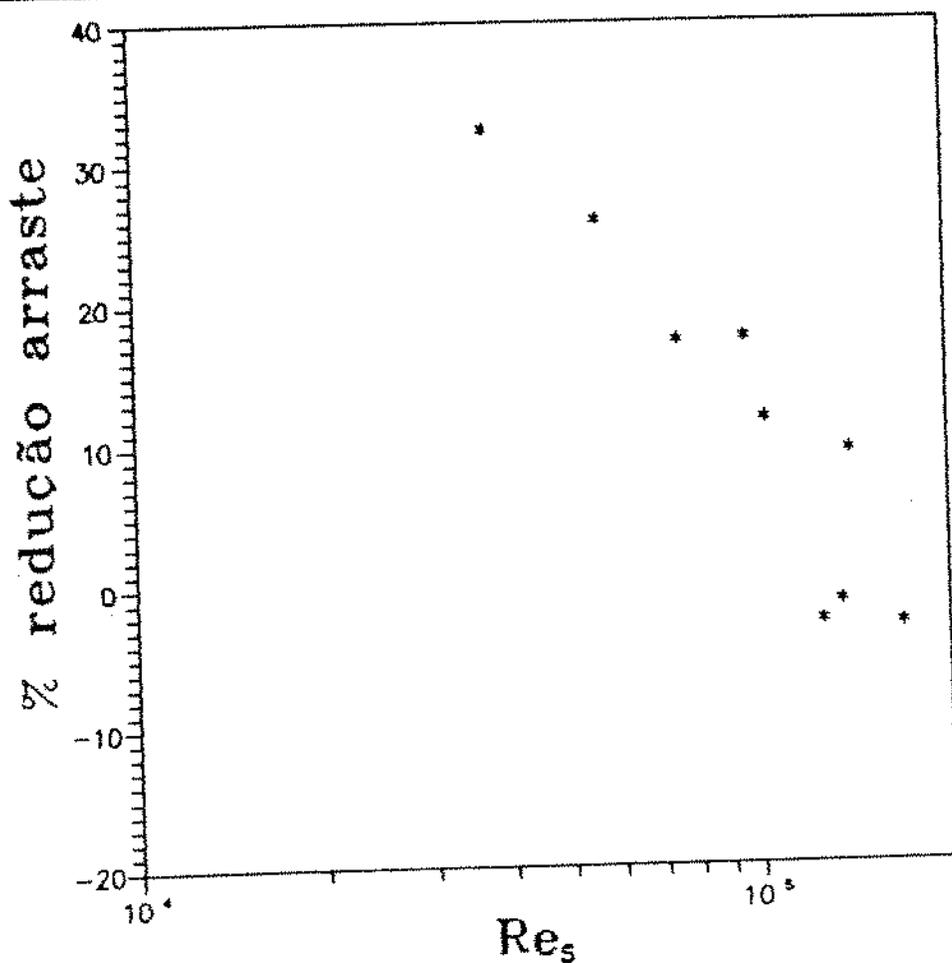


Figura 4.20 %R em função número de Reynolds generalizado para o tubo de 1"(2,54 cm): conc. 2852 ppm

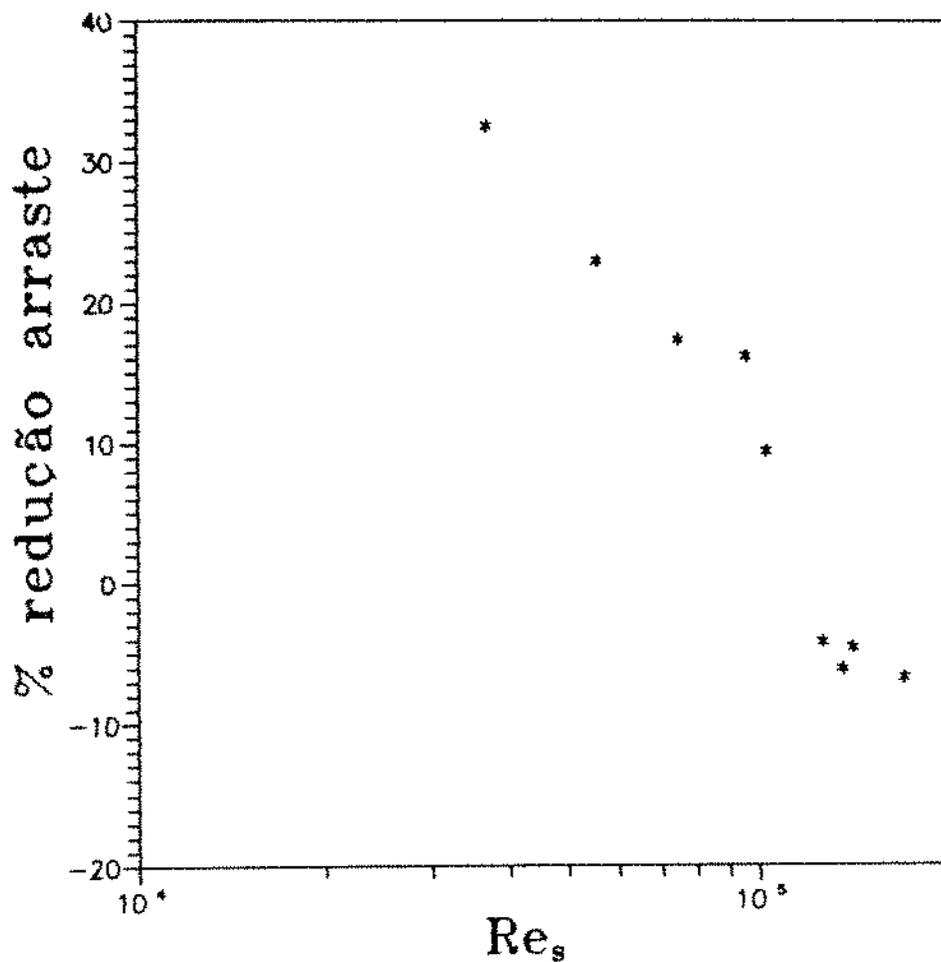


Figura 4.21 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1" (2,54 cm): conc. 4280 ppm

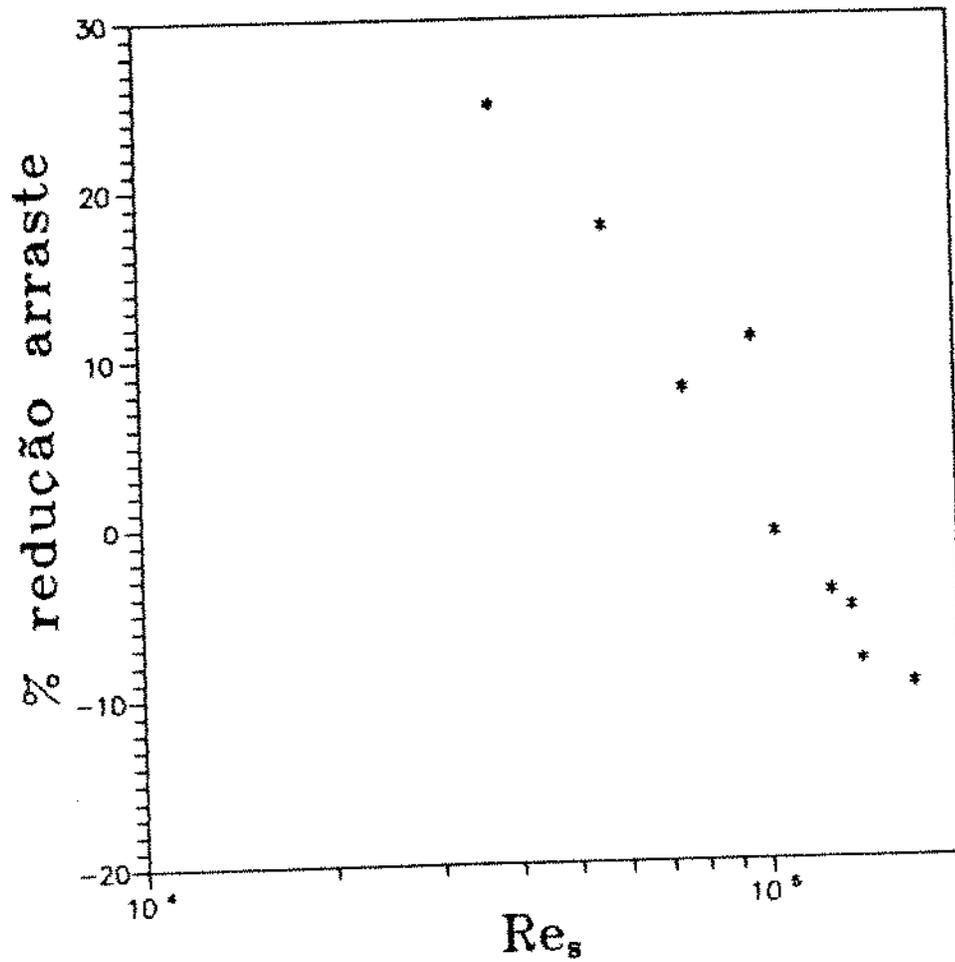


Figura 4.22 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1" (2,54 cm): conc. 5704 ppm

4.6.2. Escoamento do Fluido de Perfuração no Tubo de 3,18 cm

Pelas figuras 4.23 a 4.27, pode-se visualizar a ocorrência do fenômeno de redução de arraste, também, para o escoamento de fluidos de perfuração em tubo de 3,18 cm. Para melhorar a análise dividiu-se, novamente, os dados do escoamento em baixas (entre 713 e 1569 ppm), médias (entre 1854 e 2853 ppm), e altas (maiores que 2853 ppm) concentrações, respectivamente. Como anteriormente observado, os dados indicaram maiores reduções nos fatores de fricção, à concentrações mais baixas, enquanto as reduções para concentrações intermediárias e altas mantiveram-se em patamares um pouco inferiores.

Como observado para o tubo de 1", a curva de Atáide[2] manteve-se num patamar mais elevado de fator de atrito que a curva obtida neste trabalho para o fluido de perfuração a partir da correlação:

$$f = \frac{0,0933}{(Re_{RS})^{0,218}} \quad (4.5)$$

Cuja a validade é:

- Para suspensões argilosas, como fluidos de perfuração inibidos com NaCl;
- Para escoamento em tubos de 3,18 cm;
- Para escoamento com número de Reynolds entre 15000 e 72000.

A razão para a diferença entre as constantes, das relações (2.41) e (4.5), já foi anteriormente comentada.

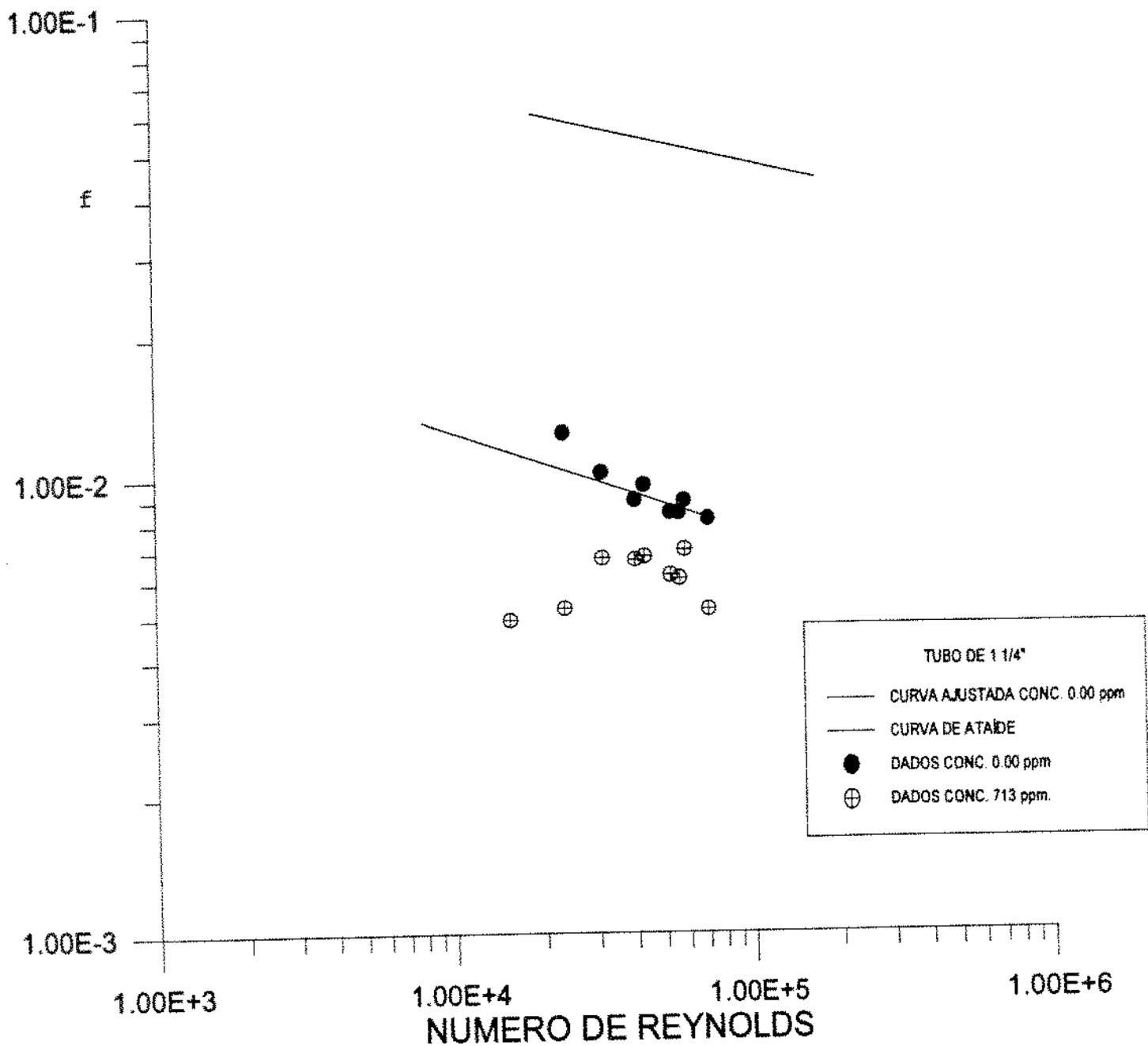


Figura 4.23 Gráfico $f \times Re_{RS}^2$: curva ajustada dados experimentais para o solvente, dados experimentais para o solvente contendo 713 ppm e a curva de Ataíde, usando tubo de de 1 1/4" (3,18 cm)

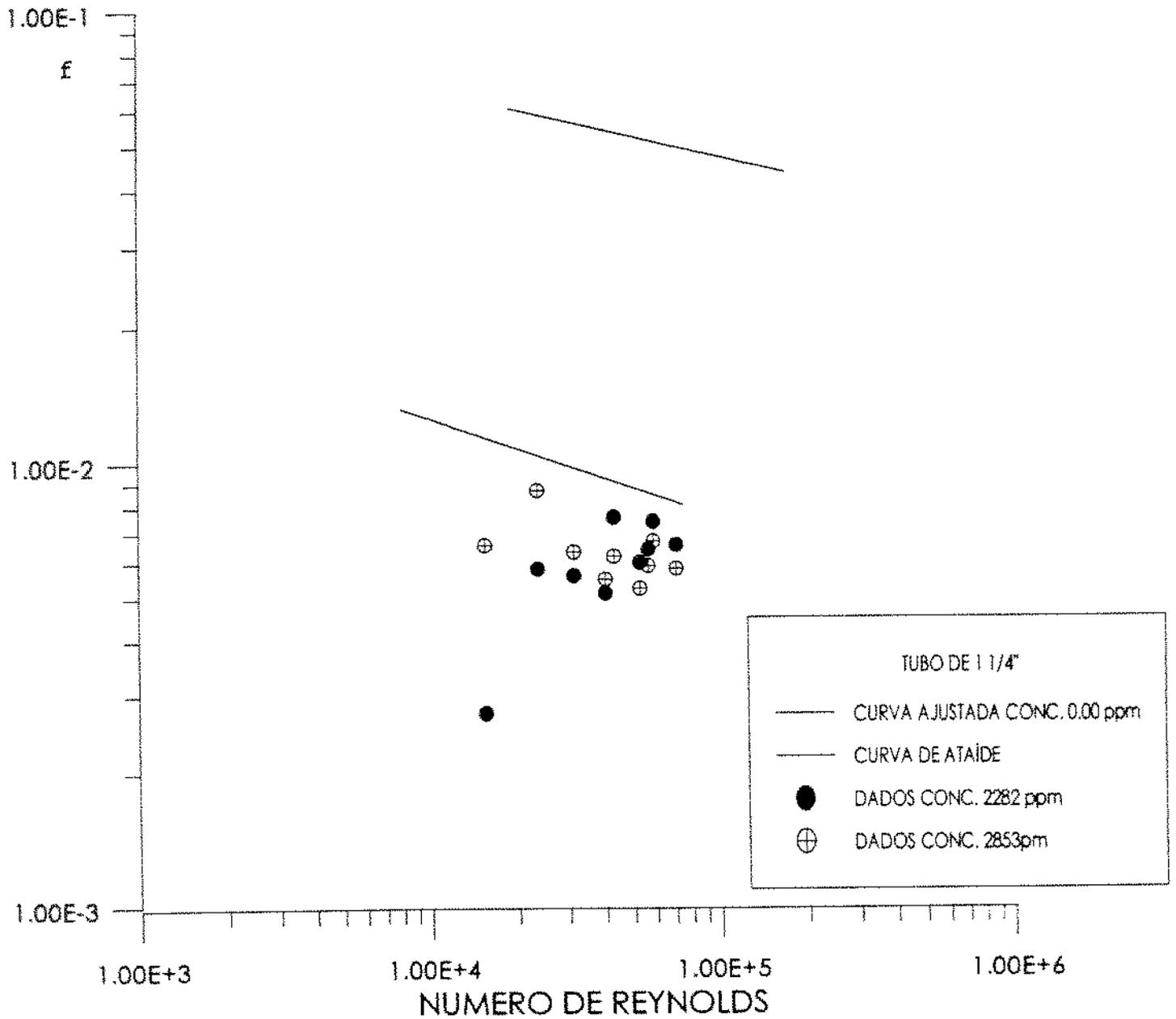


Figura 4.24 Gráfico $f \times Re_{RS}^{-1}$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2282 ppm e 2853 ppm, respectivamente, usando tubo de 1 1/4" (3,18 cm)

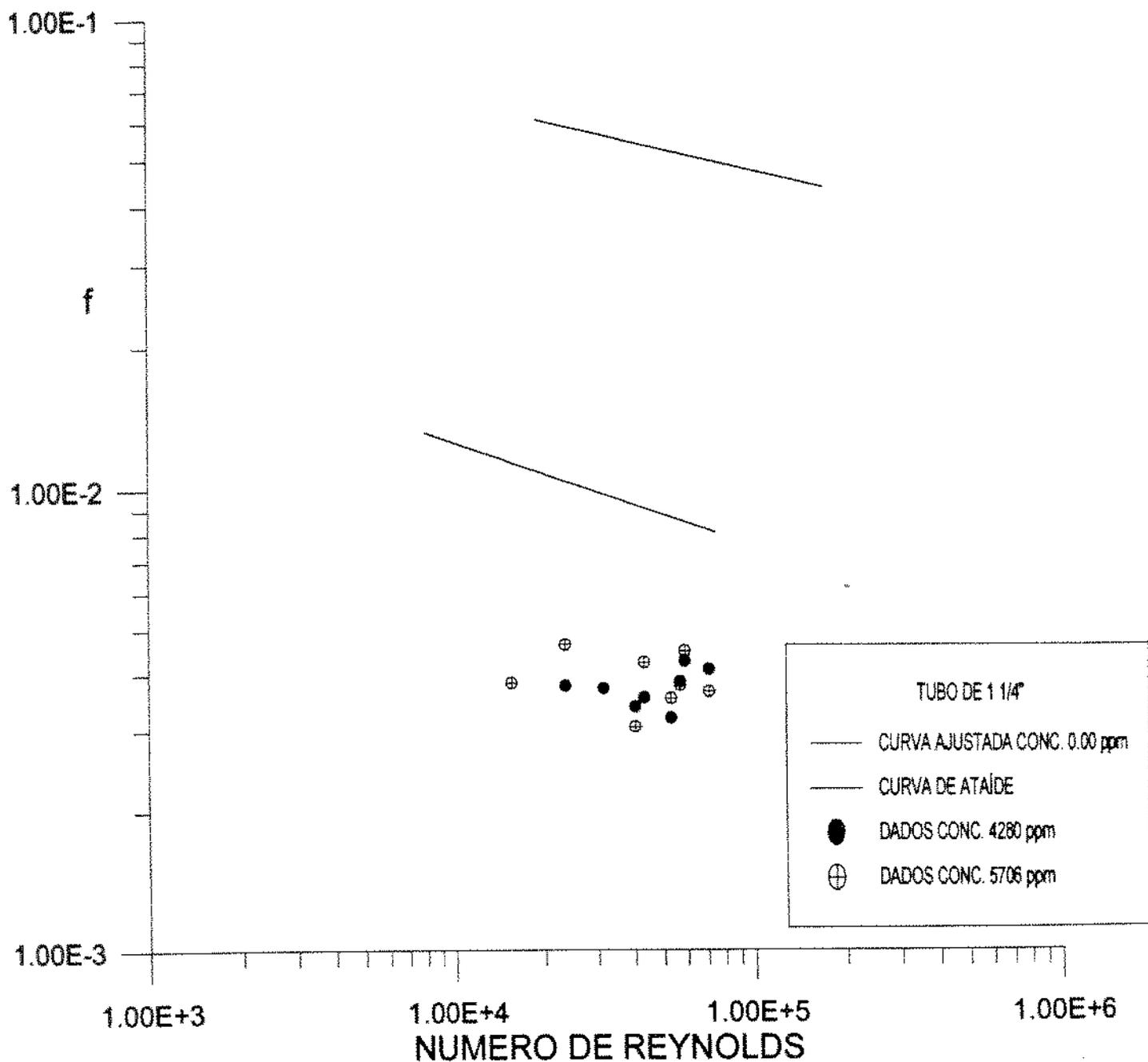


Figura 4.25

Gráfico $f \times Re_{RS}^2$: curva ajustada para o solvente, curva de Ataíde e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 4280 ppm e 5706 ppm, respectivamente, usando tubo de 1 1/4" (3,18 cm)

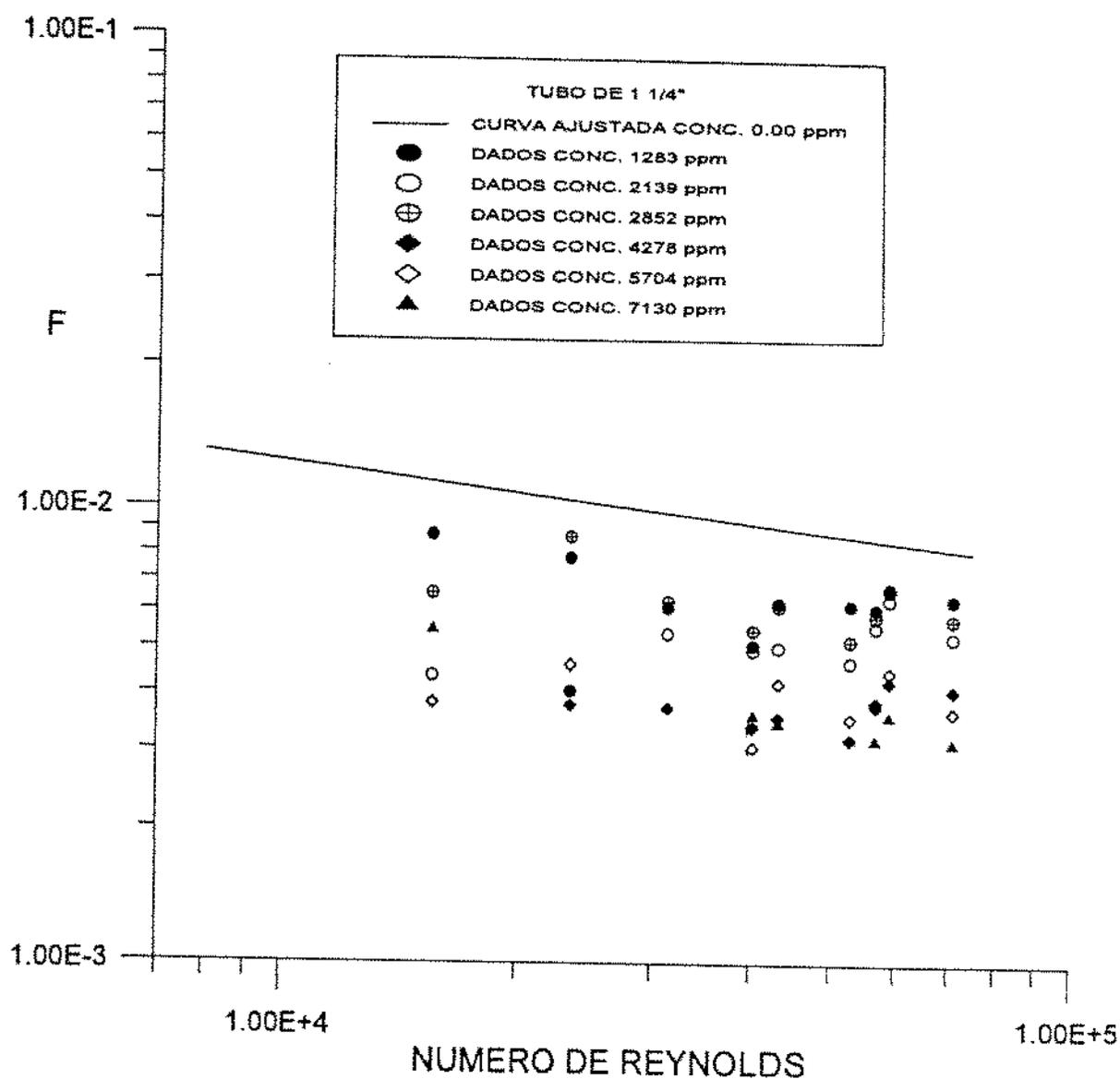


Figura 4.26 Gráfico $f \times Re_{AS}^*$: curva ajustada e dados experimentais de diversas concentrações, usando tubo de 1 1/4" (3,18 cm)

Através da tabela 4.9 e das figuras 4.27 a 4.32 pôde-se verificar quantitativamente as reduções de fricção ocorridas e analisar o escoamento no tubo de 3,18 cm. Observou-se que:

1-Mantendo-se o número de **Reynolds** fixo, enquanto eleva-se a concentração de poliacrilamida hidrolisada, não foi possível identificar uma tendência predominante de crescimento ou decréscimo do percentual de redução de arraste com o aumento da concentração de polímero. Houve sim, um comportamento oscilatório nesse índice.

2-Mantendo-se a concentração de poliacrilamida fixa, enquanto eleva-se gradualmente o número de **Reynolds**, ocorreu uma pequena diminuição no percentual de redução de arraste, seguido de uma estabilização nesses índices.

Tabela 4.9 Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de **Reynolds** generalizado, tubo de 3,18 cm

# de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)						
	713	1141	1284	1369	1712	1854	2140
23590	58,14	65,12	37,21	60,47	48,84	13,95	67,44
31526	34,33	60,00	40,00	56,36	30,91	1,82	47,27
40379	25,71	58,57	42,86	51,43	20,00	-8,57	44,29
43350	29,76	55,95	34,52	53,37	9,52	-15,48	47,62
53033	27,00	51,00	26,00	55,00	6,00	-24,00	44,00
56982	27,93	48,65	27,03	53,15	-11,71	-36,94	33,33
59206	21,60	48,00	24,00	56,00	-14,40	-47,20	28,00
71132	36,42	56,29	21,19	59,60	-1,32	-30,07	34,44

# de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)					
	2882	2853	4280	4993	5706	7133
23590	53,49	30,23	69,77	62,79	62,79	67,44
31526	45,45	38,18	63,64	60,00	63,64	63,64
40379	42,86	38,57	62,00	57,14	65,75	60,00
43350	21,43	38,71	63,10	57,14	55,95	64,29
53033	29,00	38,00	62,00	52,00	58,00	62,00
56982	23,42	29,73	54,05	46,85	34,95	62,16
59206	16,80	24,00	52,00	52,80	49,60	60,00
71132	19,21	28,48	49,67	49,67	54,37	61,59

Essa observação está de acordo com a tendência de decréscimo no percentual de redução com a elevação do número de **Reynolds** do escoamento, observada no tubo de 2,54 cm. Entretanto, o escoamento com tubo de 3,18 cm iniciou com valores mais elevados de redução de arraste, seguido de um ligeiro declínio e estabilização, enquanto no escoamento com o tubo de 2,54 cm ocorreu, de um modo geral, um decréscimo da redução até que não se verificou mais o fenômeno, a altas concentrações. A causa dessa diferença de comportamento está na faixa de número de **Reynolds** obtida nos experimentos. Para o tubo de 3,18 cm, os experimentos foram feitos para número de Reynolds entre 15000 a 72000, enquanto no tubo menor trabalhou-se numa faixa de número de Reynolds bem maior, entre 19000 e 170000. Além disso, existiu a diferença nos diâmetros dos tubos. Assim, a conjunção desses fatores levou a que tensões cisalhantes, resultantes do escoamento, fossem menores para o tubo de diâmetro igual a 3,18 cm que naquele de 2,54 cm. Com isso, foi obtido menor grau de degradação para a poliacrilamida hidrolisada presente no fluido de perfuração escoando no tubo de diâmetro maior.

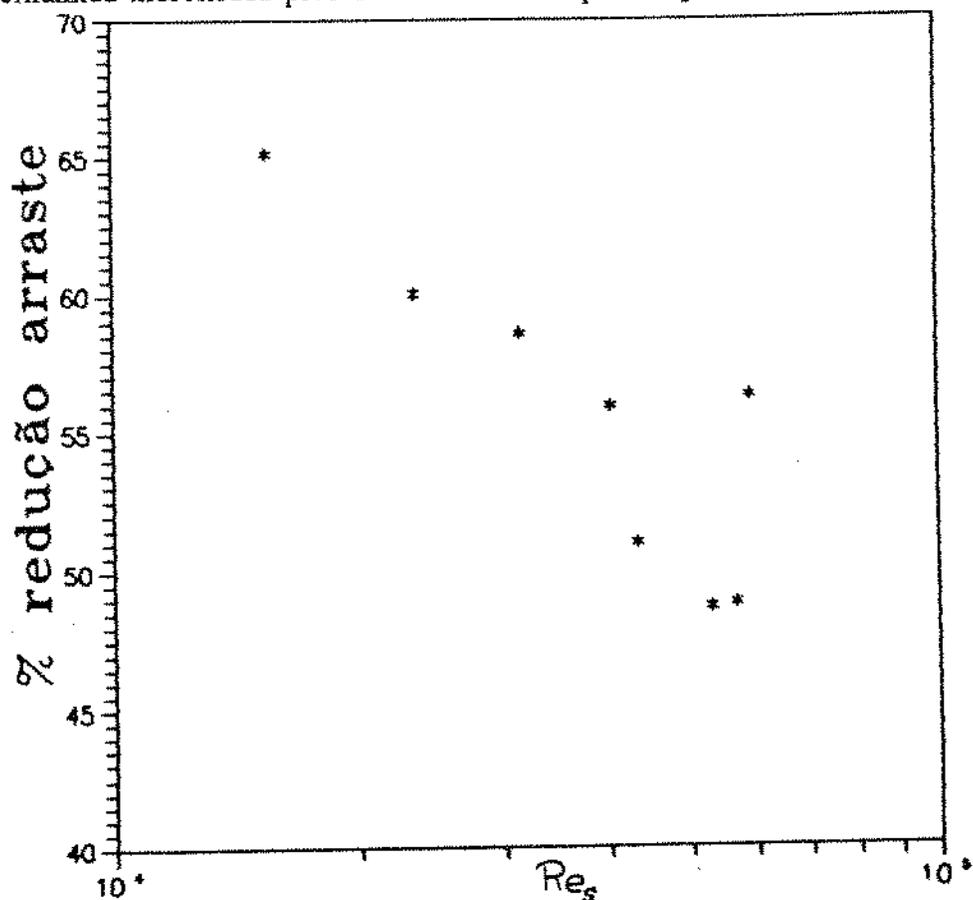


Figura 4.27

%R em função do número de **Reynolds** generalizado para o tubo de 1 1/4" (3,18 cm): conc. 713 ppm

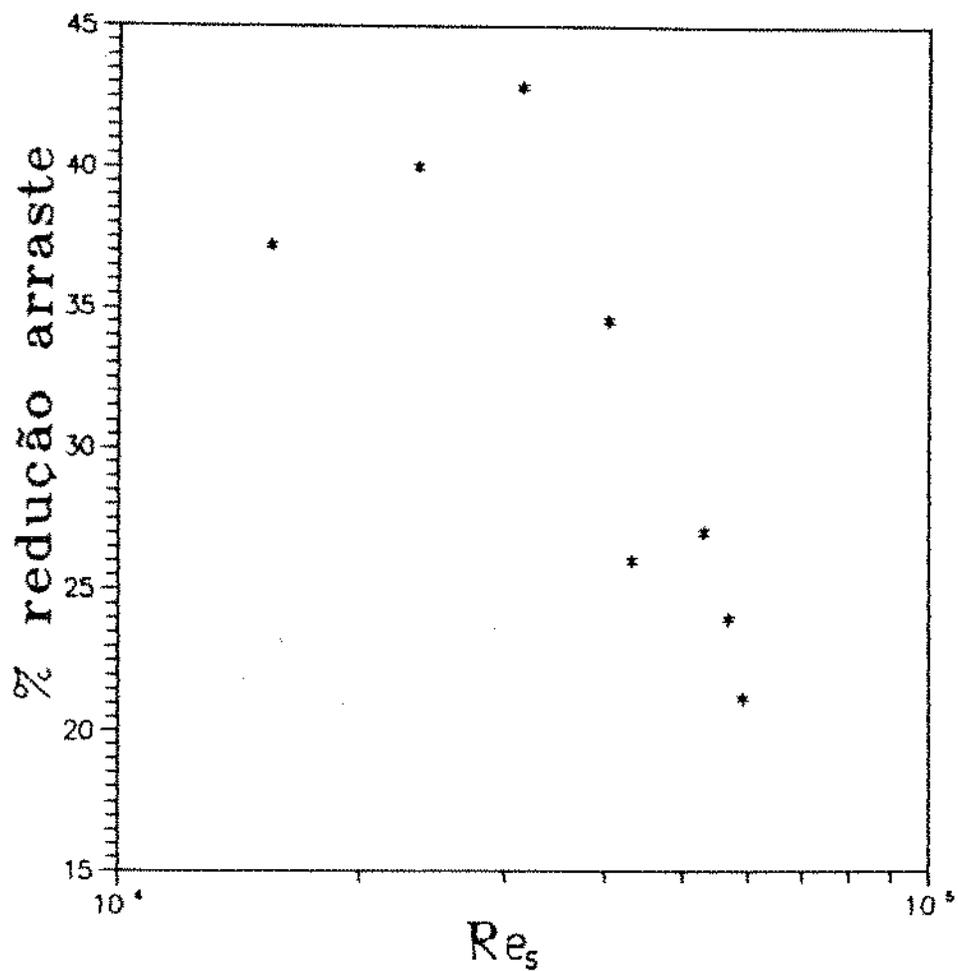


Figura 4.28 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1/4" (3,18 cm): conc. 1141 ppm

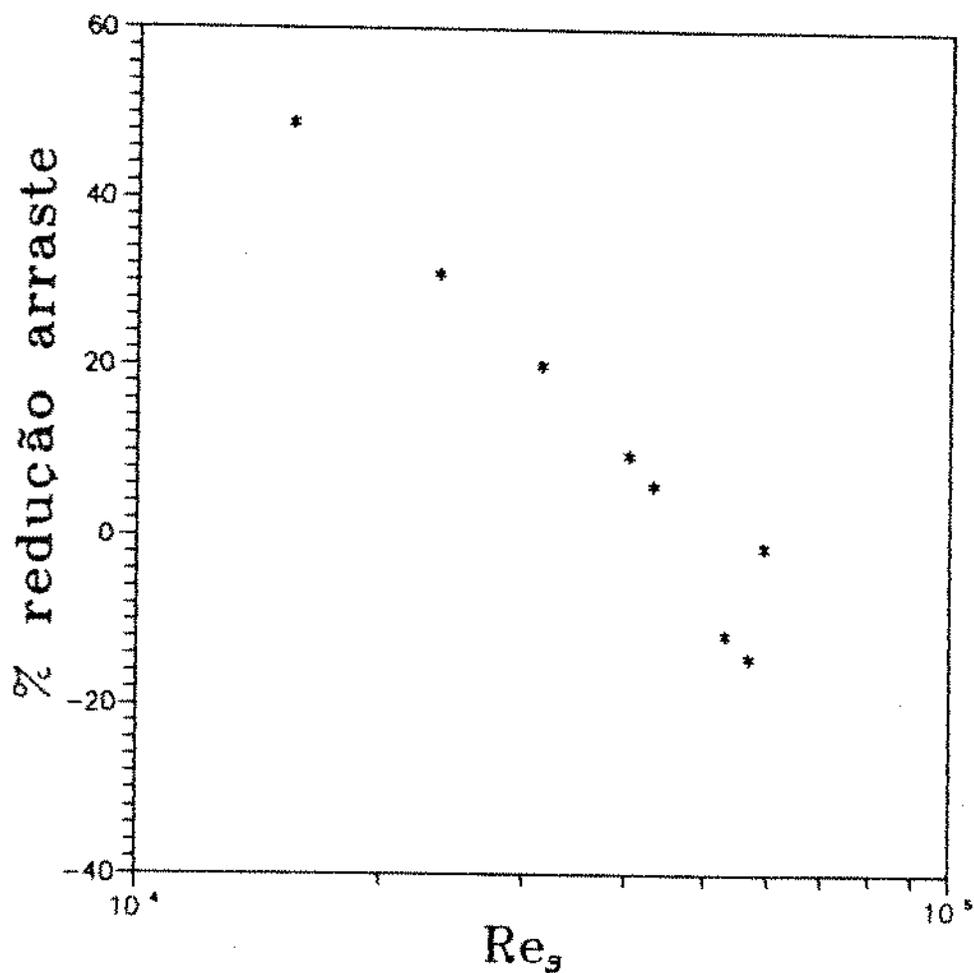


Figura 4.29 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1/4"(3,18 cm): conc. 1569 ppm

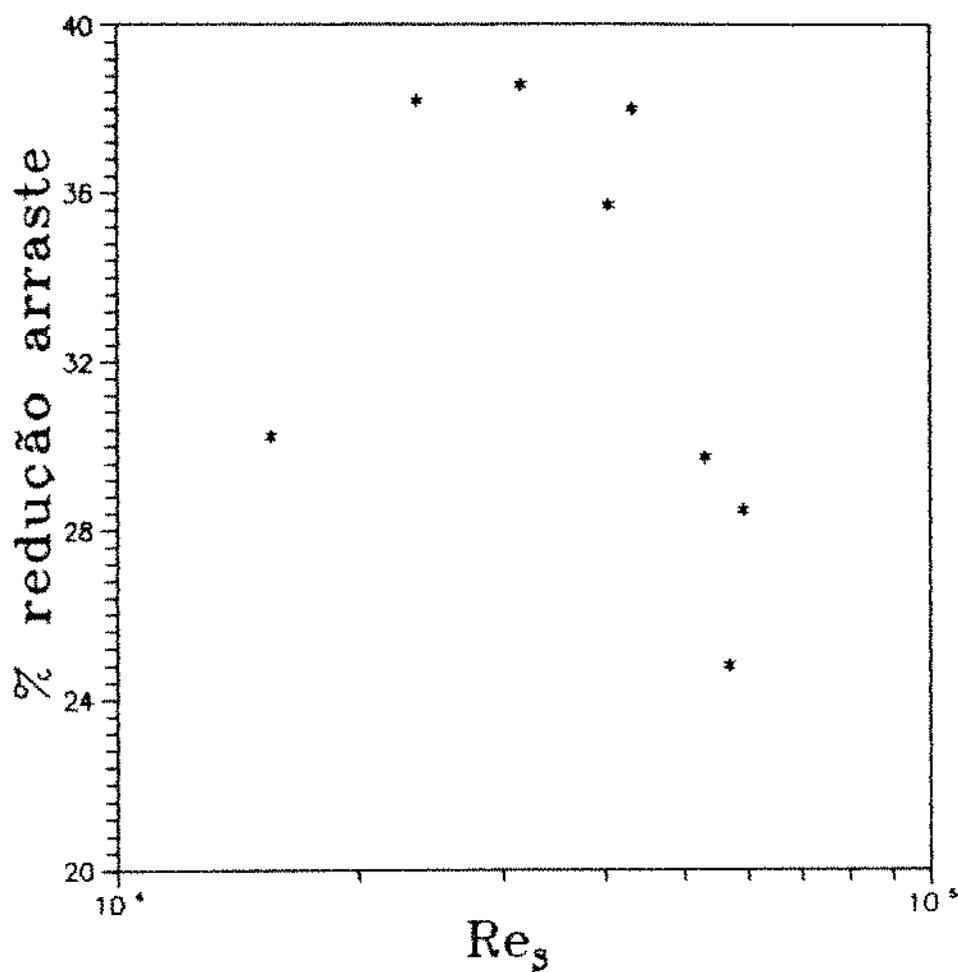


Figura 4.30 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼" (3,18 cm): conc. 2282 ppm

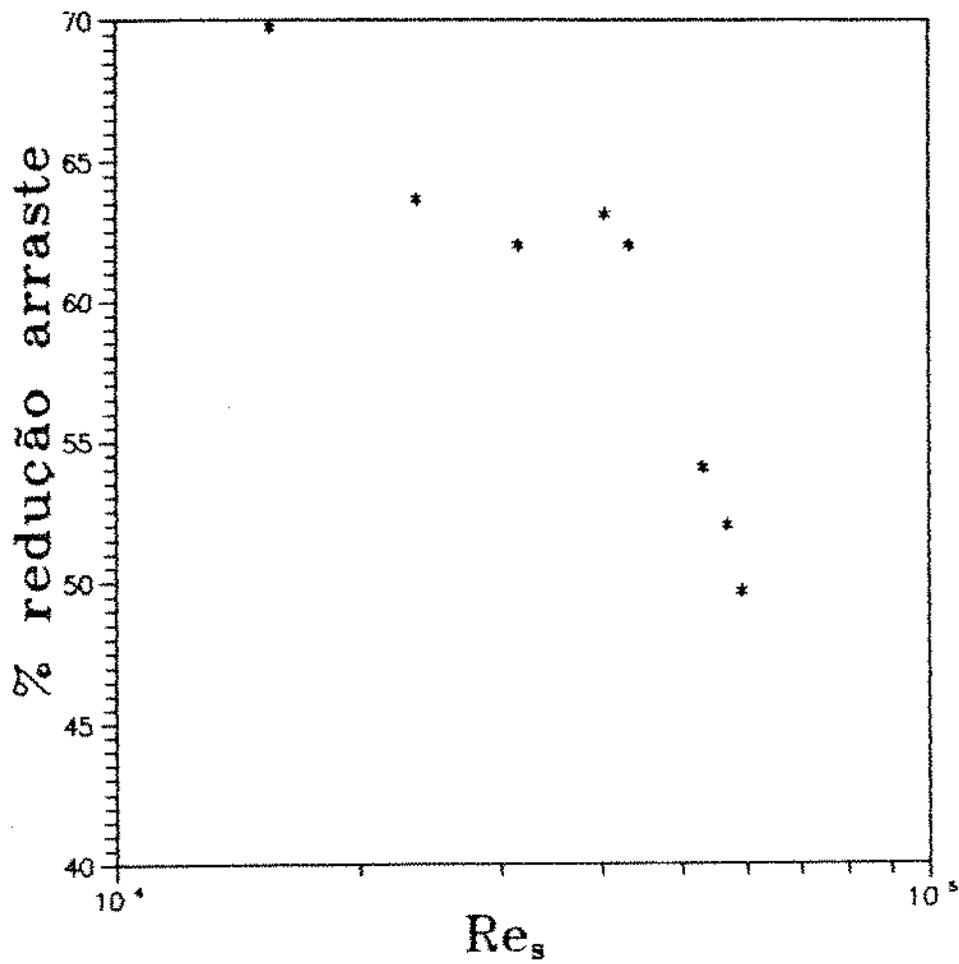


Figura 4.31 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de $1/4''$ (3,18 cm): conc. 2852 ppm

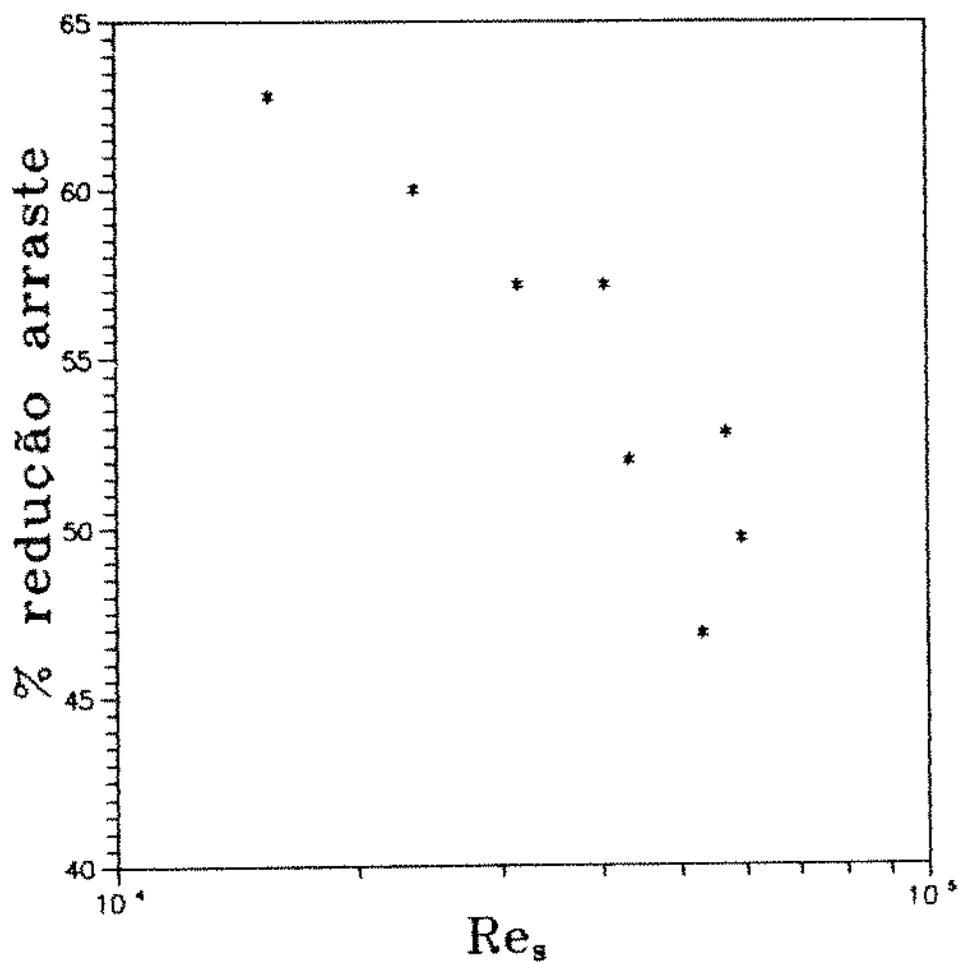


Figura 4.32 %R em função do número de Reynolds generalizado para o tubo de 1¼" (3,18 cm): conc. 4280 ppm

4.6.3. Escoamento do Fluido de Perfuração Através do Anular 7,62/5,08cm

As figuras 4.33 a 4.39 permitiram a visualização do fenômeno de redução de arraste para escoamento anular. Os experimentos confirmam a mesma tendência de comportamento observada nos experimentos realizados nos tubos.

Nas figuras 4.33 a 4.39 tem-se duas curvas, sendo a de baixo obtida a partir da correlação (2.49), desenvolvida por Paixão[53] para escoamento anular de fluido de perfuração que se ajusta ao modelo reológico de Robertson-Stiff. A outra curva foi obtida a partir da correlação desenvolvida neste trabalho:

$$f = \frac{0,407}{(Re_{RS})^{0,402}} \quad (4.6)$$

Cuja validade é:

- Para suspensões argilosas, tais como fluidos de perfuração inibidos com NaCl;
- Para escoamento em anular entre tubos de 7,62 cm e 5,08 cm;
- Escoamentos com número de Reynolds variando entre 8000 e 18500.

Além das curvas, nesses gráficos, são vistos os dados experimentais. E na figura (4.35) podem ser visto os dados experimentais empregados no ajuste da curva (4.6).

Observa-se diferenças nas constantes das correlações (2.49) e (4.6), cuja origem está na composição dos fluidos de perfuração usados nas respectivas modelagens. A correlação (2.49), desenvolvida por Paixão[53], foi modelada a partir de um fluido de perfuração simples (água, argila e hidróxido de sódio) enquanto o fluido deste trabalho apresentou composição e concentração de seus componentes distintas. Então, diante disso, os fluidos apresentaram propriedades reológicas distintas e por isso as correlações (2.49) e (4.6) apresentam constantes distintas.

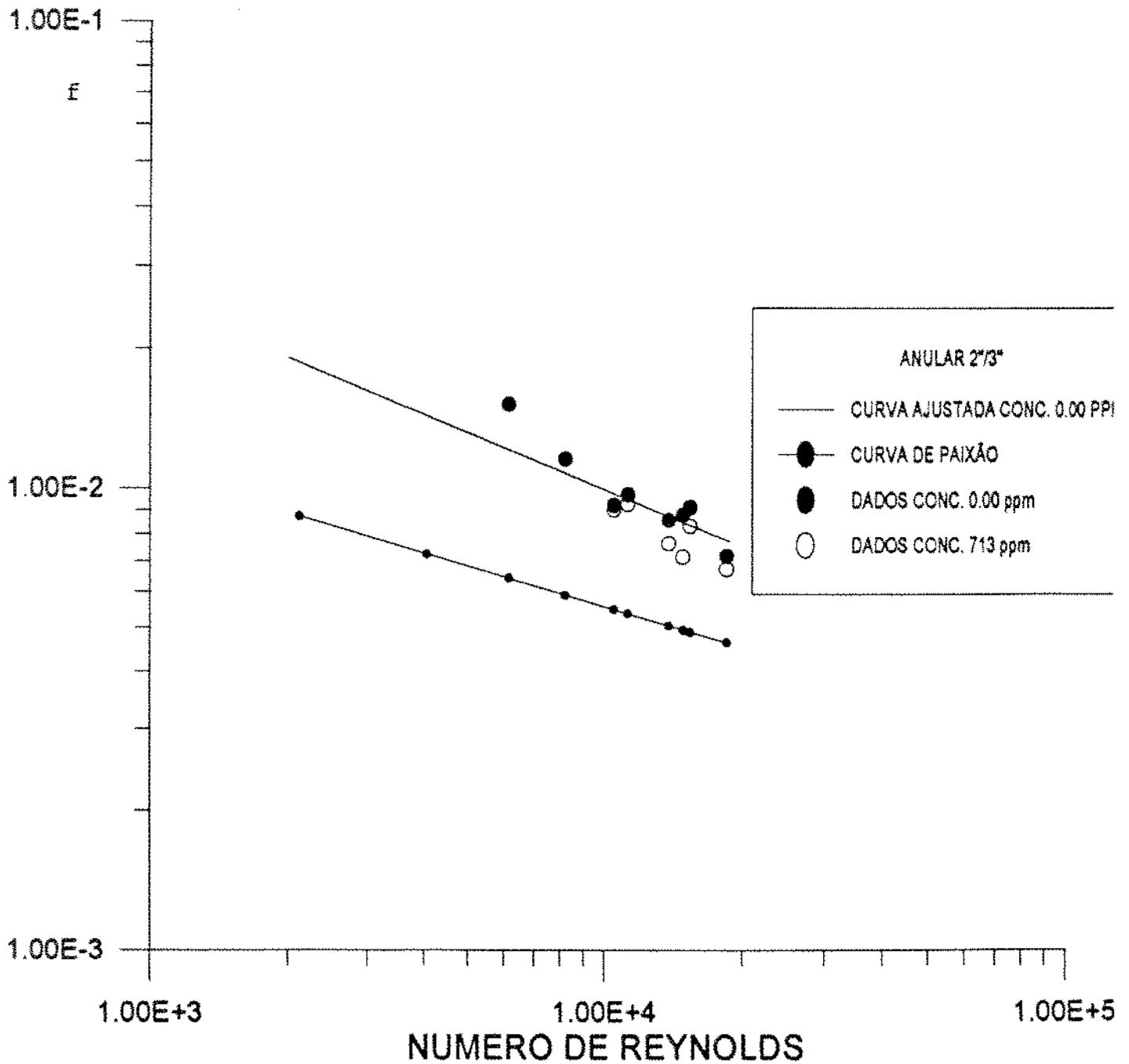


Figura 4.33 Gráfico $f \times Re_{gs}^{-1}$: curva ajustada e dados experimentais para o solvente, dados experimentais para o solvente contendo 713 ppm e a curva de Paixão, usando o anular

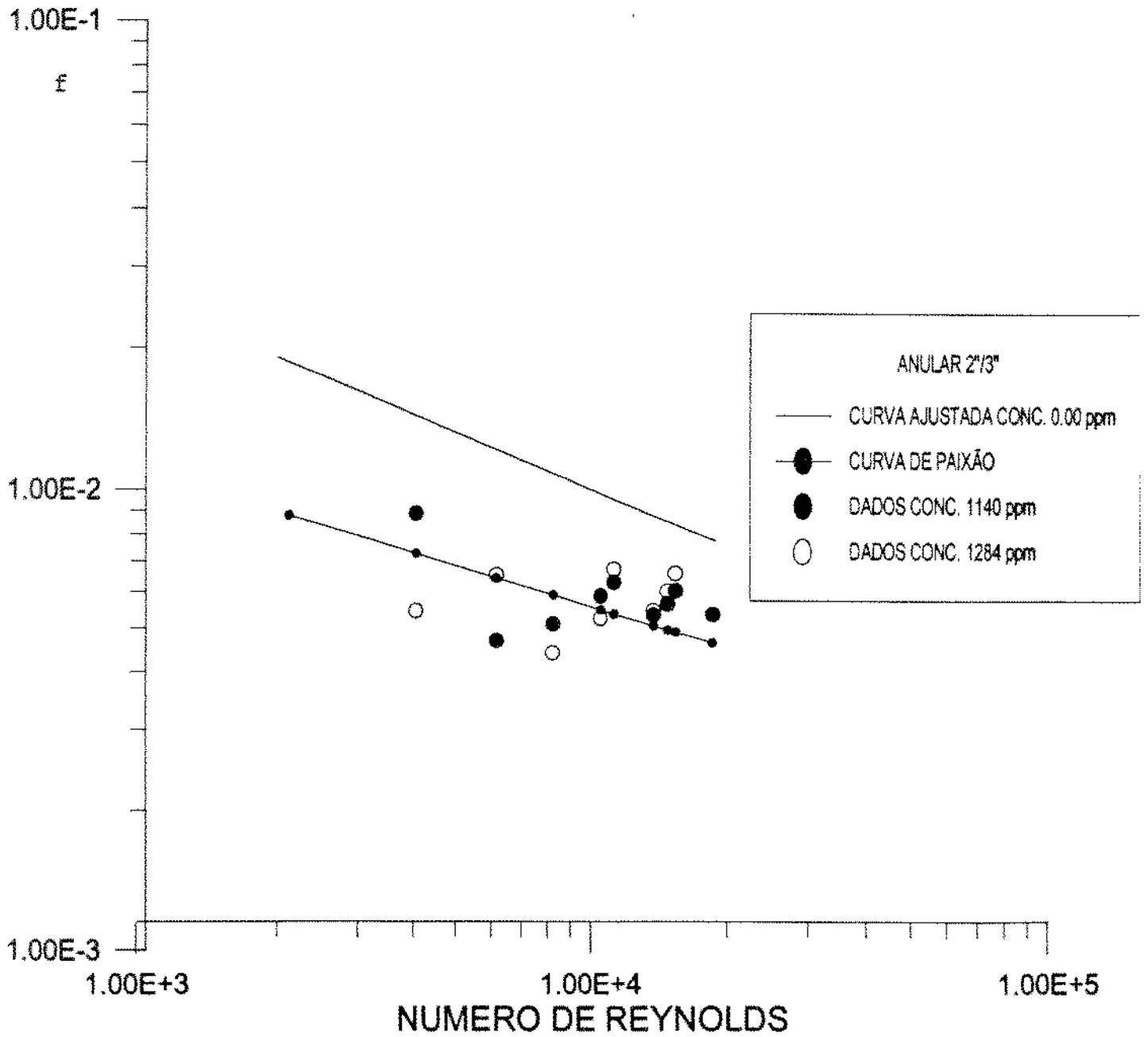


Figura 4.34 Gráfico $f \times Re_{RS}^2$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1140 ppm e 1284 ppm, respectivamente, usando o anular

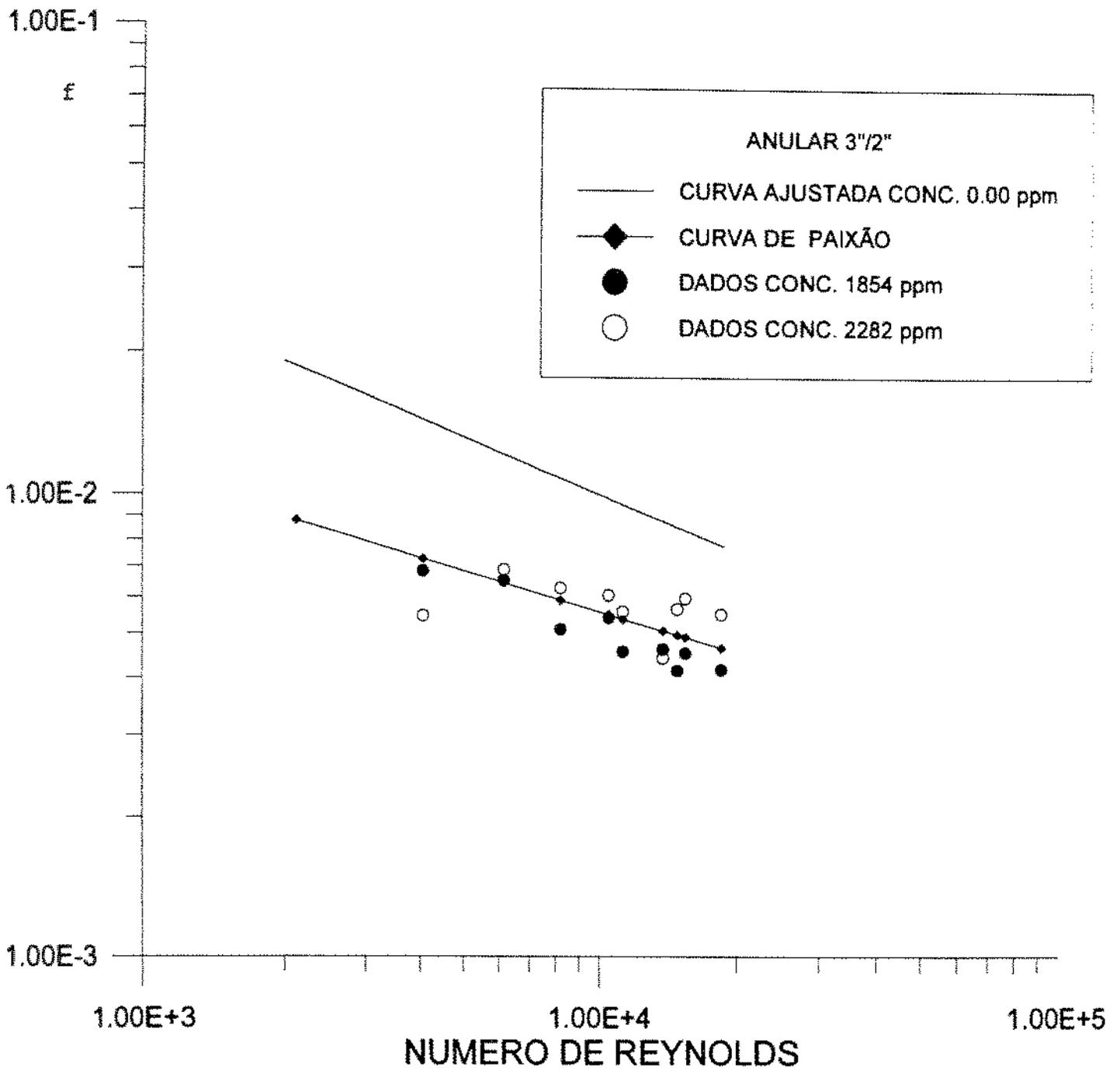


Figura 4.35 Gráfico $f \times Re_{RS}'$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 1854 ppm e 2282 ppm, respectivamente, usando o anular

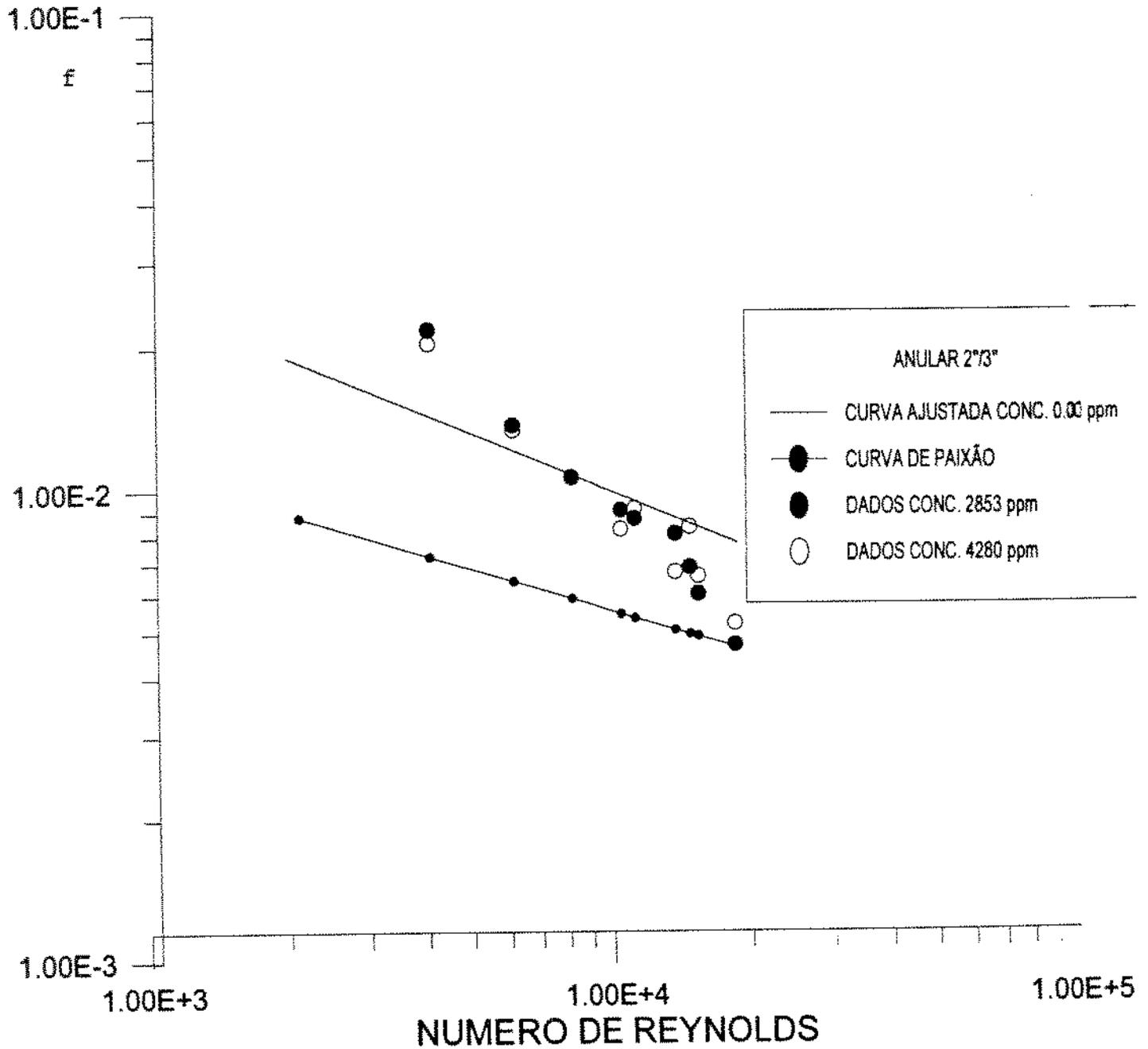


Figura 4.36 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 2853 ppm e 4280 ppm, respectivamente, usando o anular

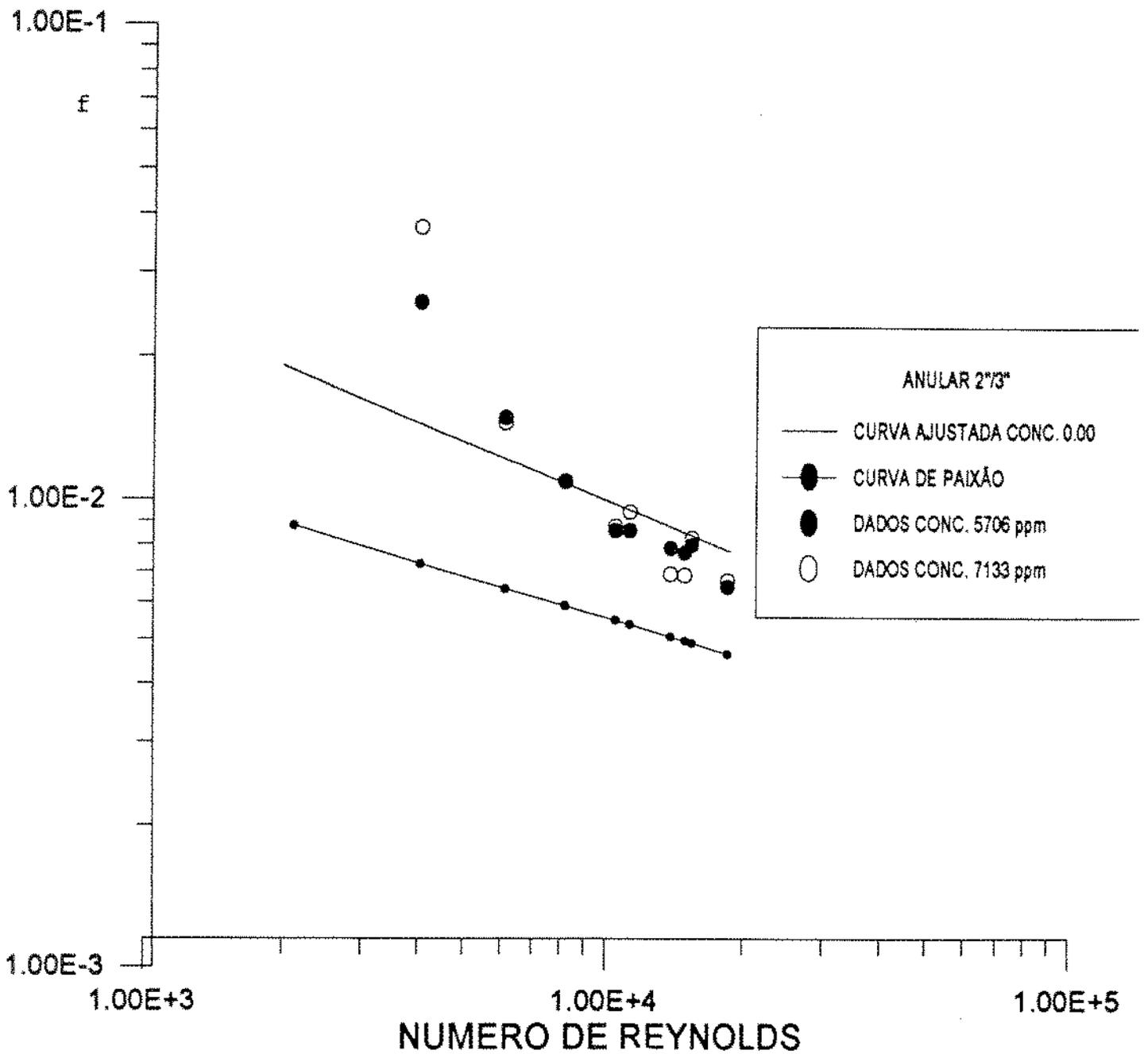


Figura 4.37 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: curva ajustada para o solvente, curva de Paixão e dados experimentais para o solvente contendo concentrações de 5706 ppm e 7133 ppm, respectivamente, usando o anular

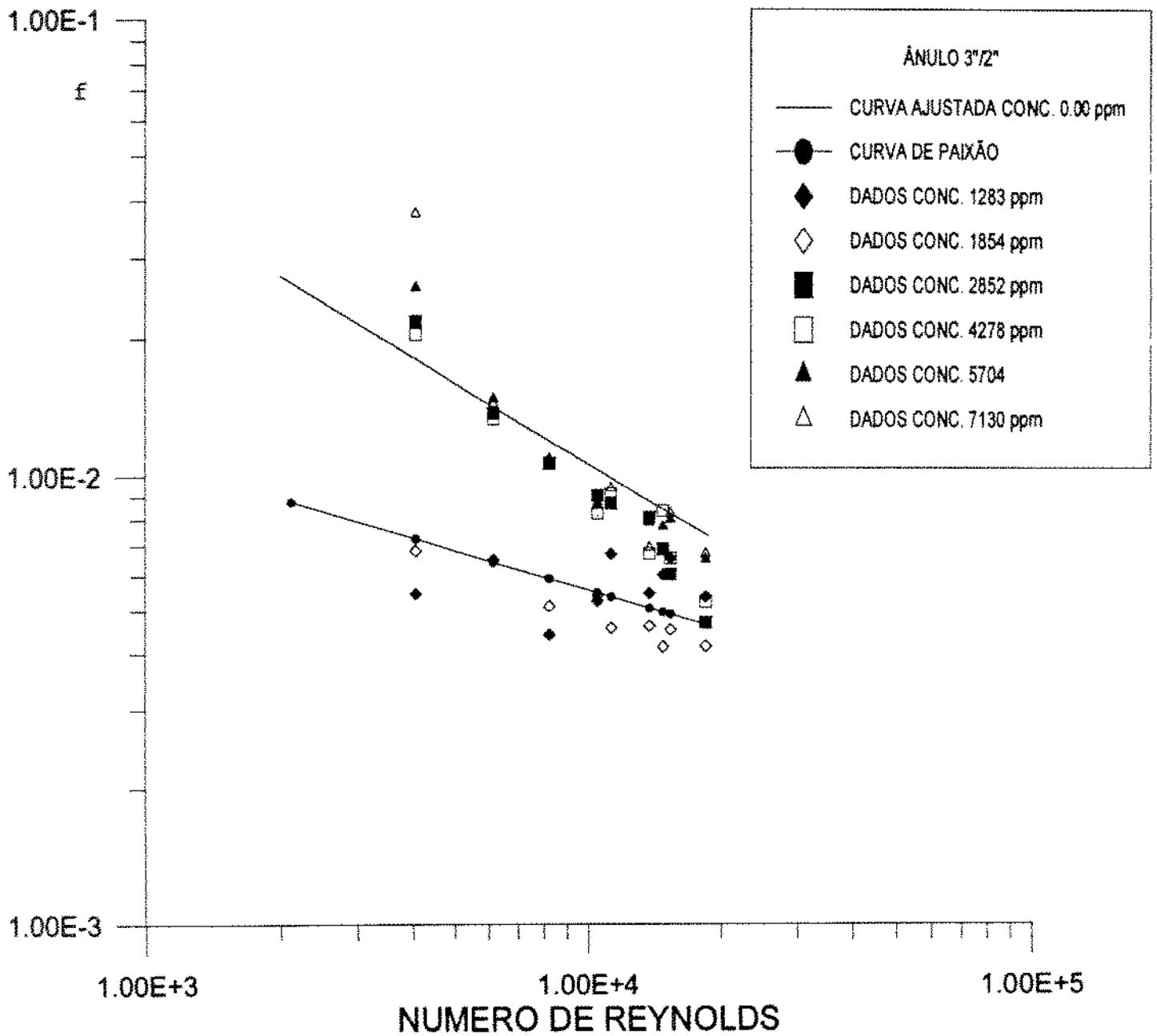


Figura 4.38 Gráfico $f \times Re_{RS}^{-1}$: curva de Paixão, curva ajustada e dados experimentais para as concentrações escolhidas para análise, usando o anular

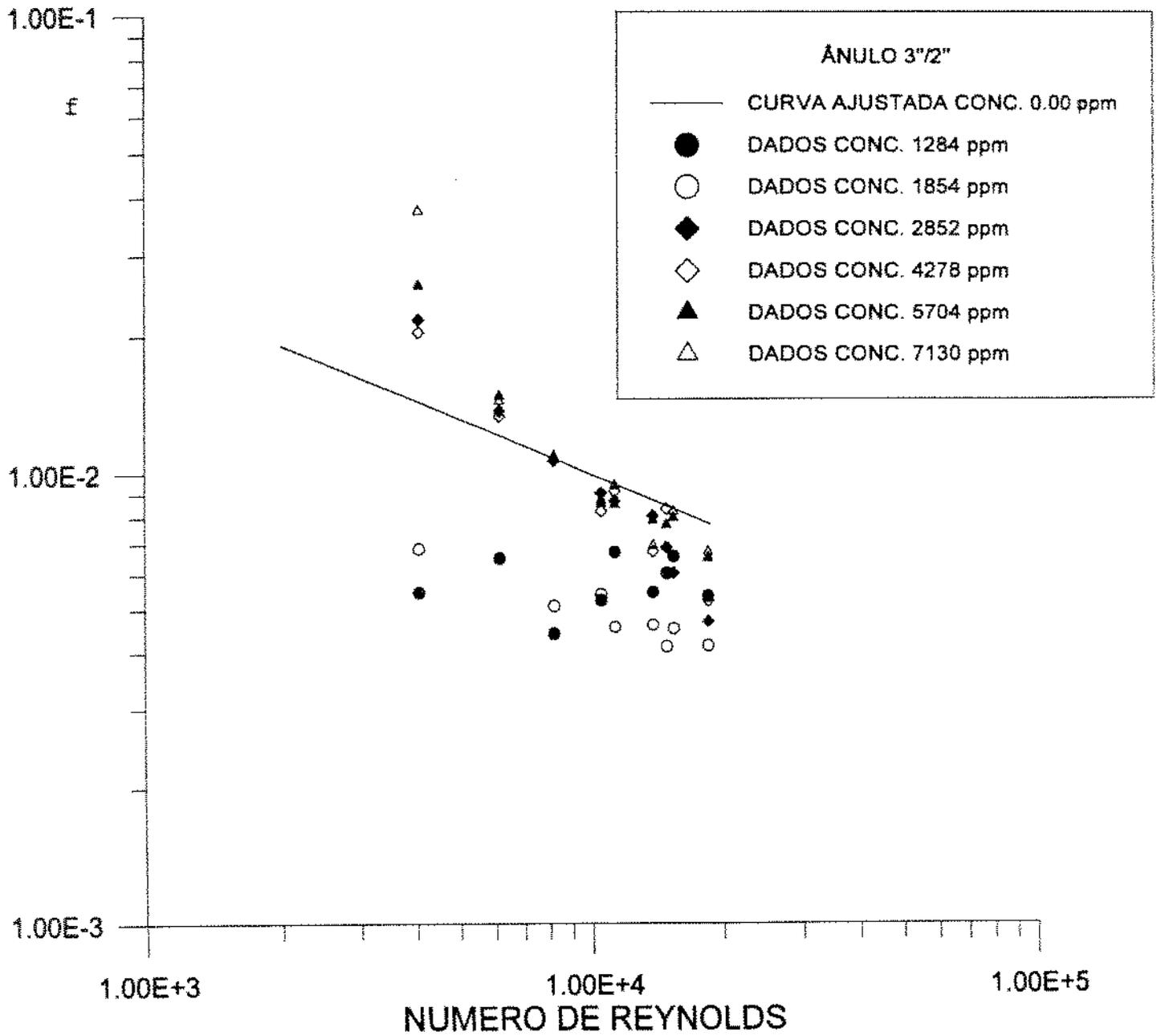


Figura 4.39 Gráfico $f \times Re_{RS}$: curva ajustada para o solvente e dados experimentais para diversas concentrações, usando o anular

O uso da tabela 4.10 em associação com as figuras 4.40 a 4.45 evidenciam as seguintes tendências de comportamento desse escoamento:

1-Mantendo-se o número de **Reynolds** fixo, enquanto eleva-se a concentração de poliacrilamida hidrolisada no solvente, observou-se um crescimento inicial no percentual de redução de arraste entre as concentrações 713 e 1141 ppm, e a partir desta ocorre um ligeiro decréscimo neste percentual seguido de uma estabilização num determinado patamar, sendo esse comportamento observado até a concentração de 2853 ppm. Acima desse valor, observa-se uma queda acentuada nestes percentuais. Isto evidencia que, para os escoamentos estudados, a poliacrilamida hidrolisada só funciona como redutor de fricção até a concentração de 2853 ppm.

2-Mantendo-se a concentração fixa enquanto elevou-se o número de **Reynolds**, observou-se uma diminuição do percentual de redução de arraste. Esse comportamento também foi observado durante o estudo com os tubos. Entretanto, o escoamento anular apresentou maiores quedas no percentual de redução de arraste que os tubos de 2,54 cm e 3,18 cm, respectivamente. Isto porque as tensões cisalhantes de parede foram mais intensas no anulo que nos tubos. À medida que aumentava-se o número de **Reynolds**, o fluido escoando no anular era submetido a tensões cisalhantes de parede geradas nas duas superfícies internas do anular, enquanto o escoamento tubular era submetido apenas às tensões cisalhantes de parede geradas no contato deste com a superfície do tubo. Associado a essas tensões existiu a ação das argilas, secundariamente. A ação desses dois fatores levou a uma degradação do polímero presente no fluido de perfuração, e sendo as tensões cisalhantes mais intensas no escoamento anular, resultou numa maior degradação nesta geometria que na tubular.

As figuras 4.46 a 4.48 mostram a influência do diâmetro e geometria na relação entre o número de **Reynolds** generalizado e fator de fricção para os escoamentos estudados.

Tabela 4.10 Percentual de redução de arraste em função da concentração e do número de Reynolds generalizado, anular

Nº de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)					
	713	1141	1284	1369	1712	1854
8284	0,00	56,00	62,00	60,00	46,00	56,00
10560	1,72	36,21	43,10	27,59	34,48	41,38
11336	4,41	35,29	30,88	32,35	33,82	52,94
13869	10,98	37,86	36,59	30,49	36,59	46,34
14901	19,15	36,17	31,91	29,79	28,72	53,19
15483	8,74	33,98	28,16	26,21	22,33	50,49
18602	6,54	25,23	25,23	14,02	8,41	42,06

Nº de Reynolds	CONCENTRAÇÃO (ppm)					
	2882	2853	4280	4993	5706	7133
8244	46,00	8,00	8,00	0,00	6,00	6,00
10560	34,48	1,72	10,34	1,72	6,90	5,17
11336	42,65	10,29	5,88	14,71	11,76	2,95
13869	48,78	6,10	21,95	20,73	8,54	19,51
14901	36,17	23,34	5,32	30,35	12,77	22,34
15483	34,95	33,98	28,16	36,89	12,62	9,71
18602	23,36	34,58	27,10	39,25	9,35	6,54

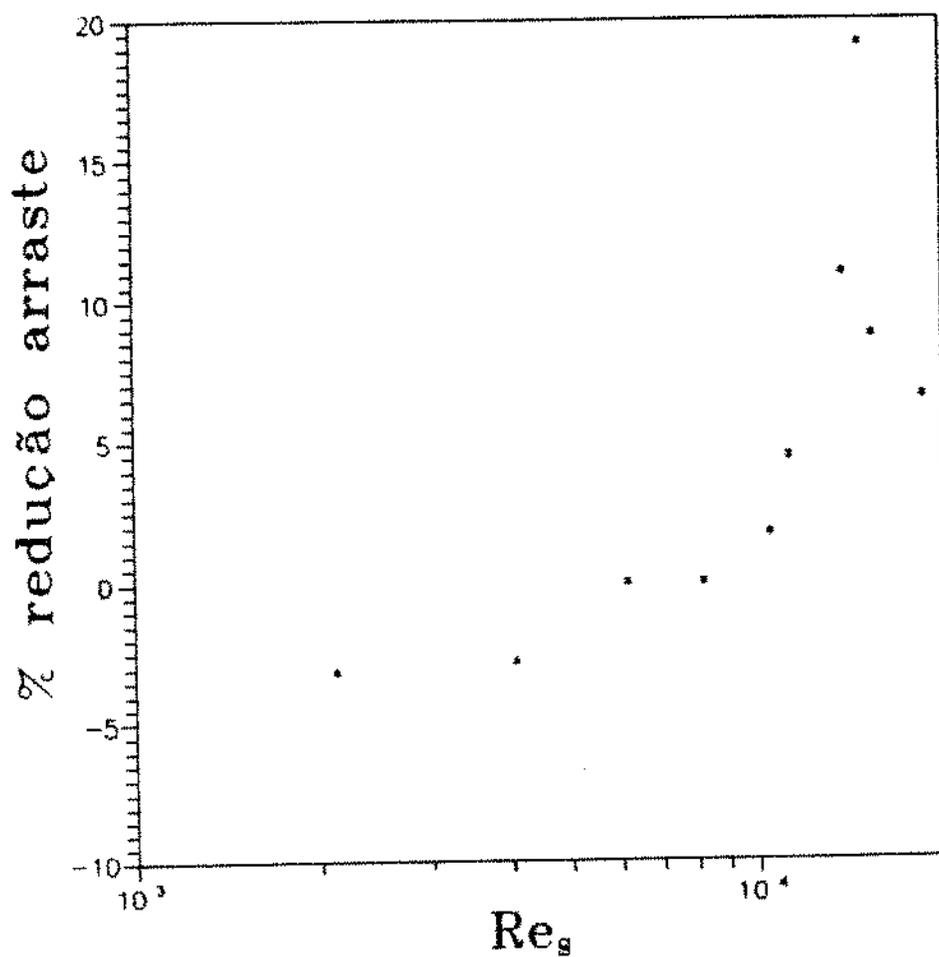


Figura 4.40 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular:
 conc. 713 ppm

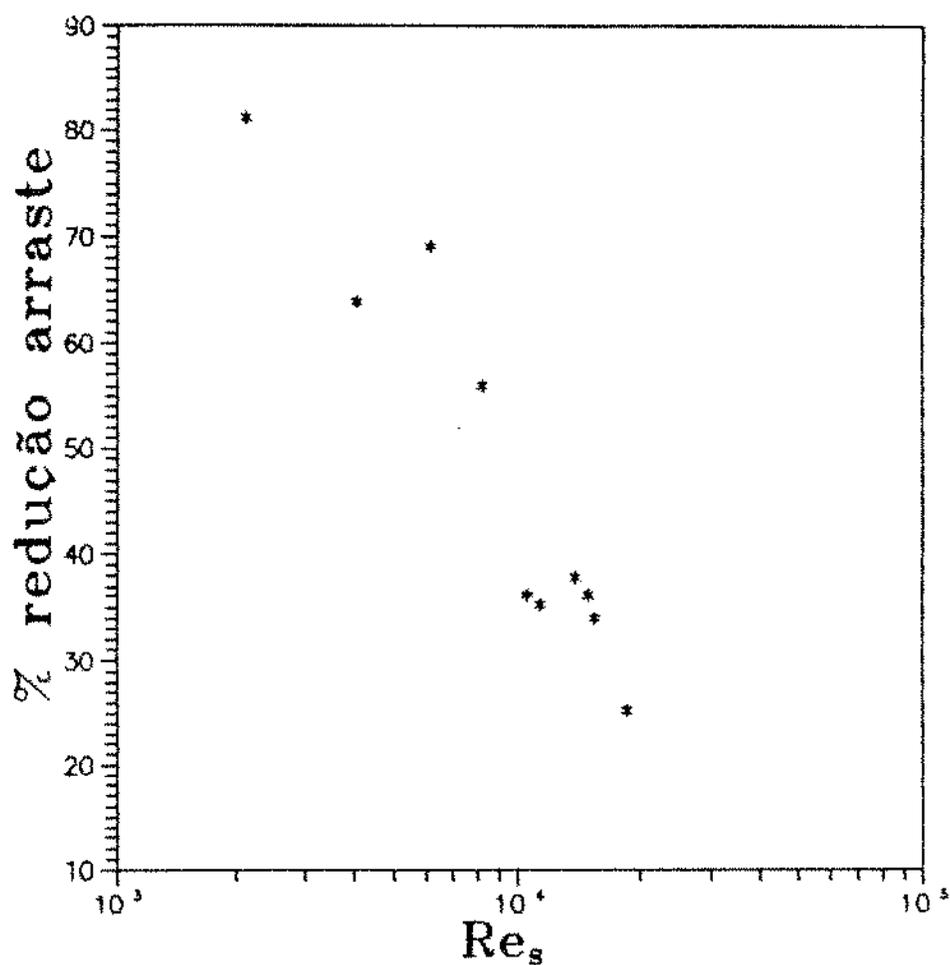


Figura 4.41 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular:
 conc. 1141 ppm

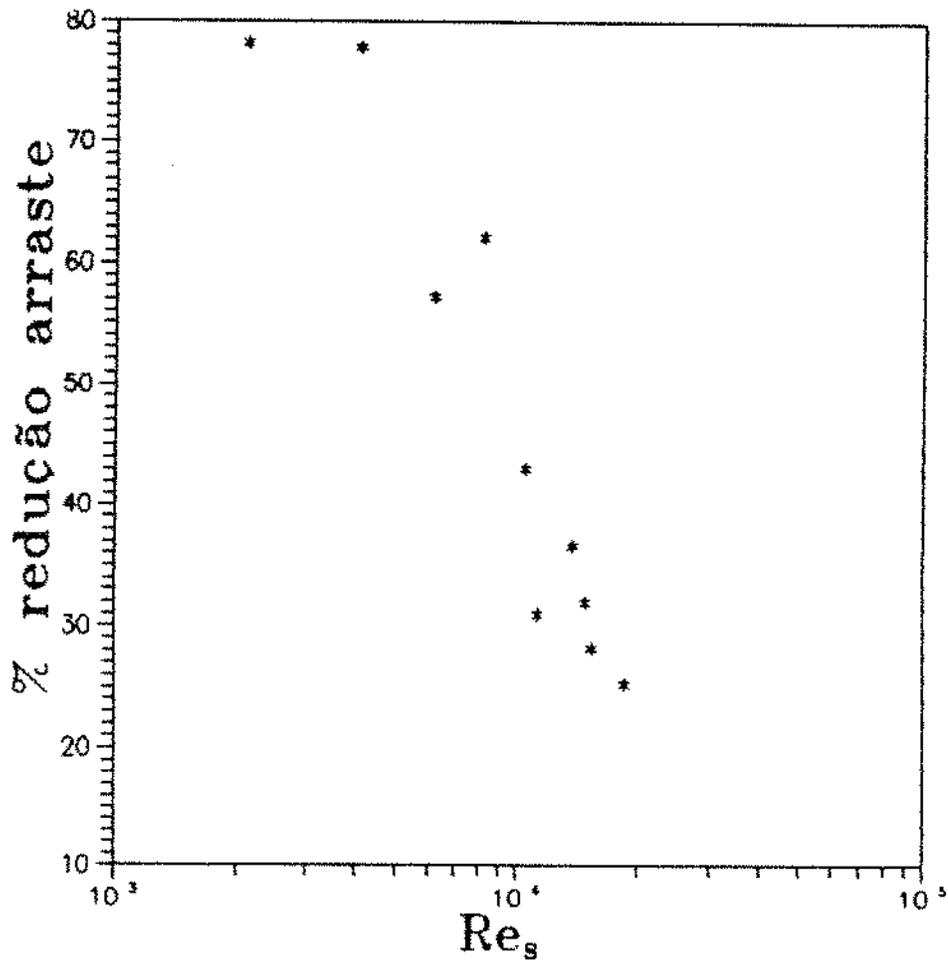


Figura 4.42 %R em função do número de **Reynolds** generalizado para o anular:
 conc. 1283 ppm

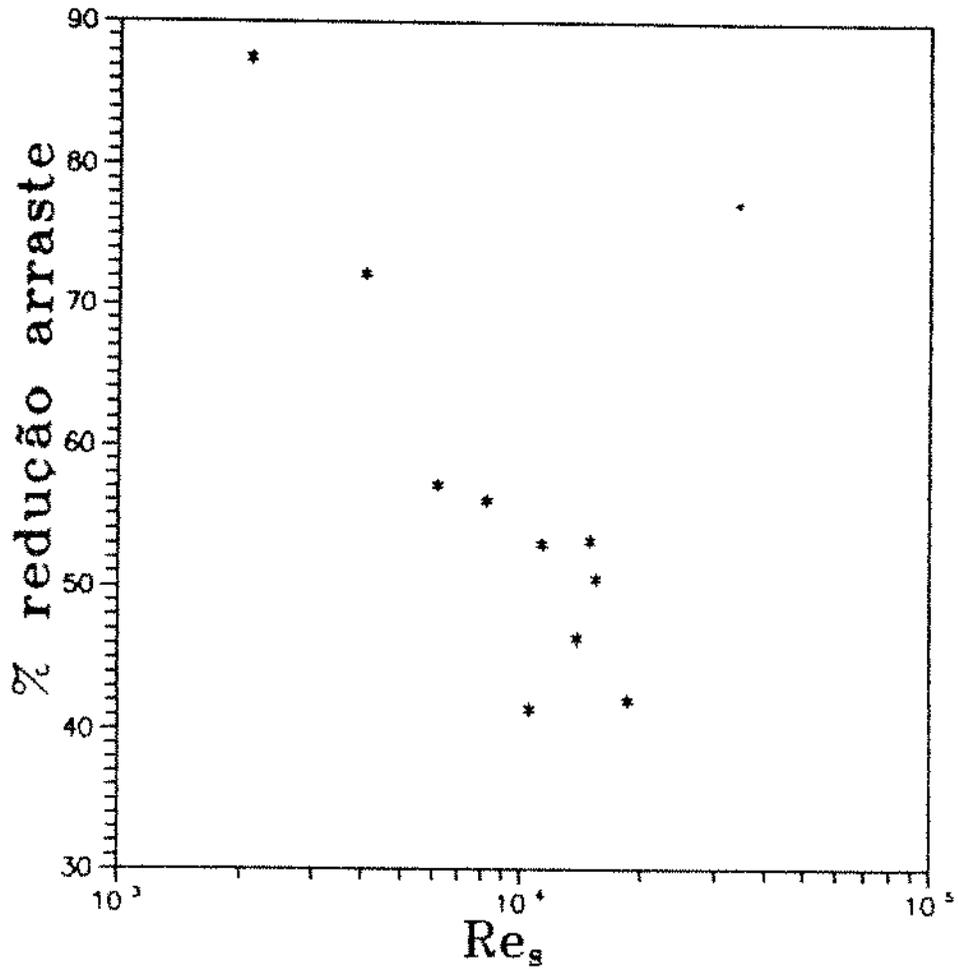


Figura 4.43 %R em função do número de **Reynolds** generalizado para o anular:
 conc. 1854 ppm

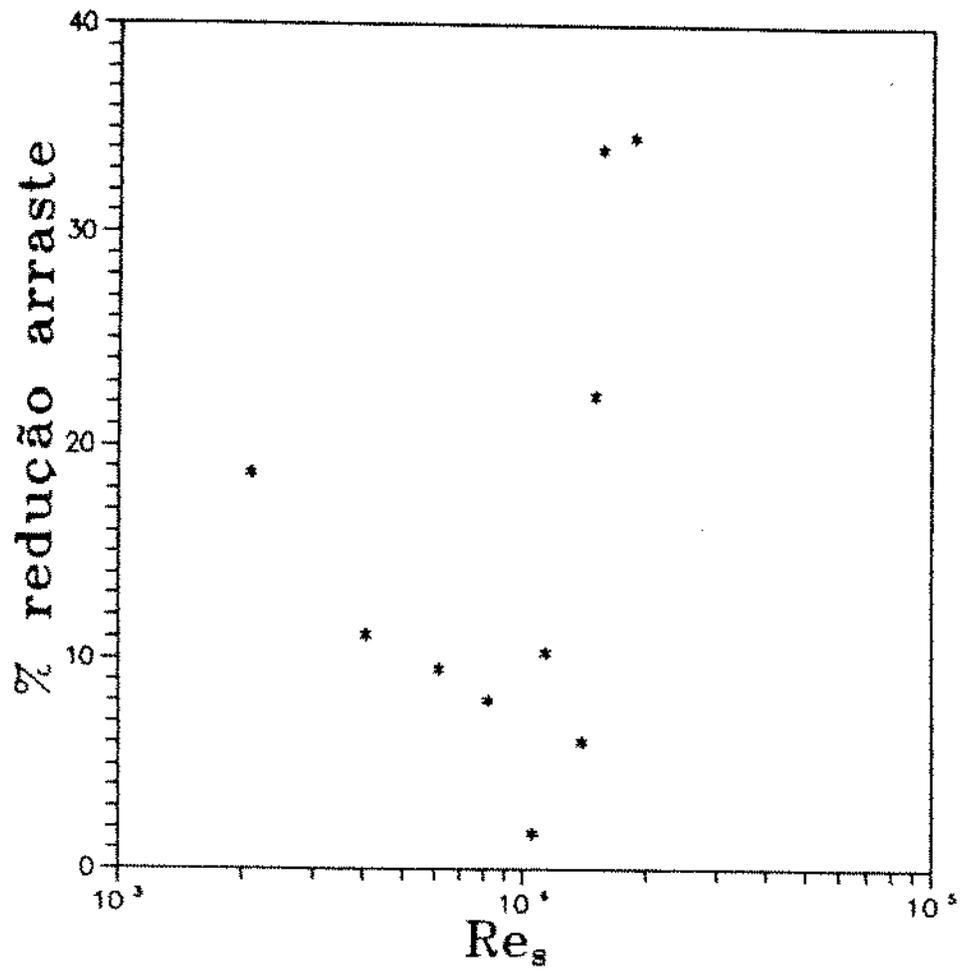


Figura 4.44 %R em função do número de **Reynolds** generalizado para o anular:
 conc. 2852 ppm

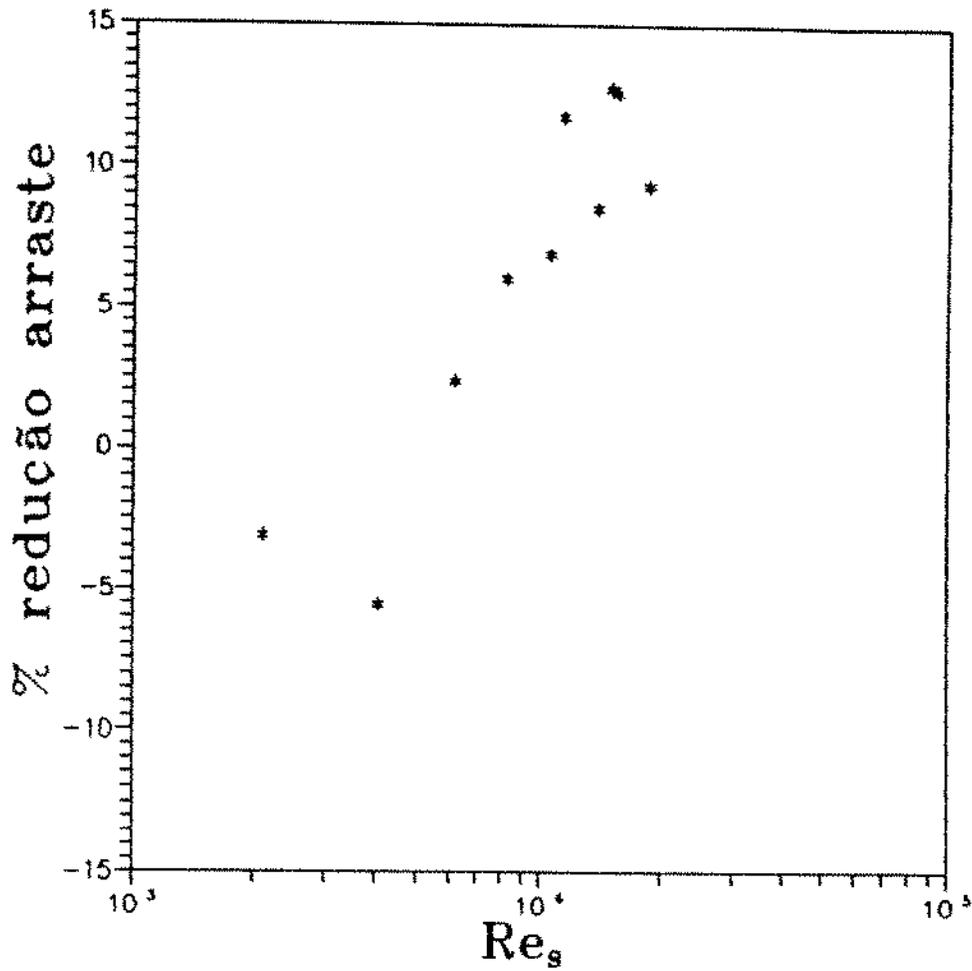


Figura 4.45 %R em função do número de Reynolds generalizado para o anular:
conc. 5704 ppm

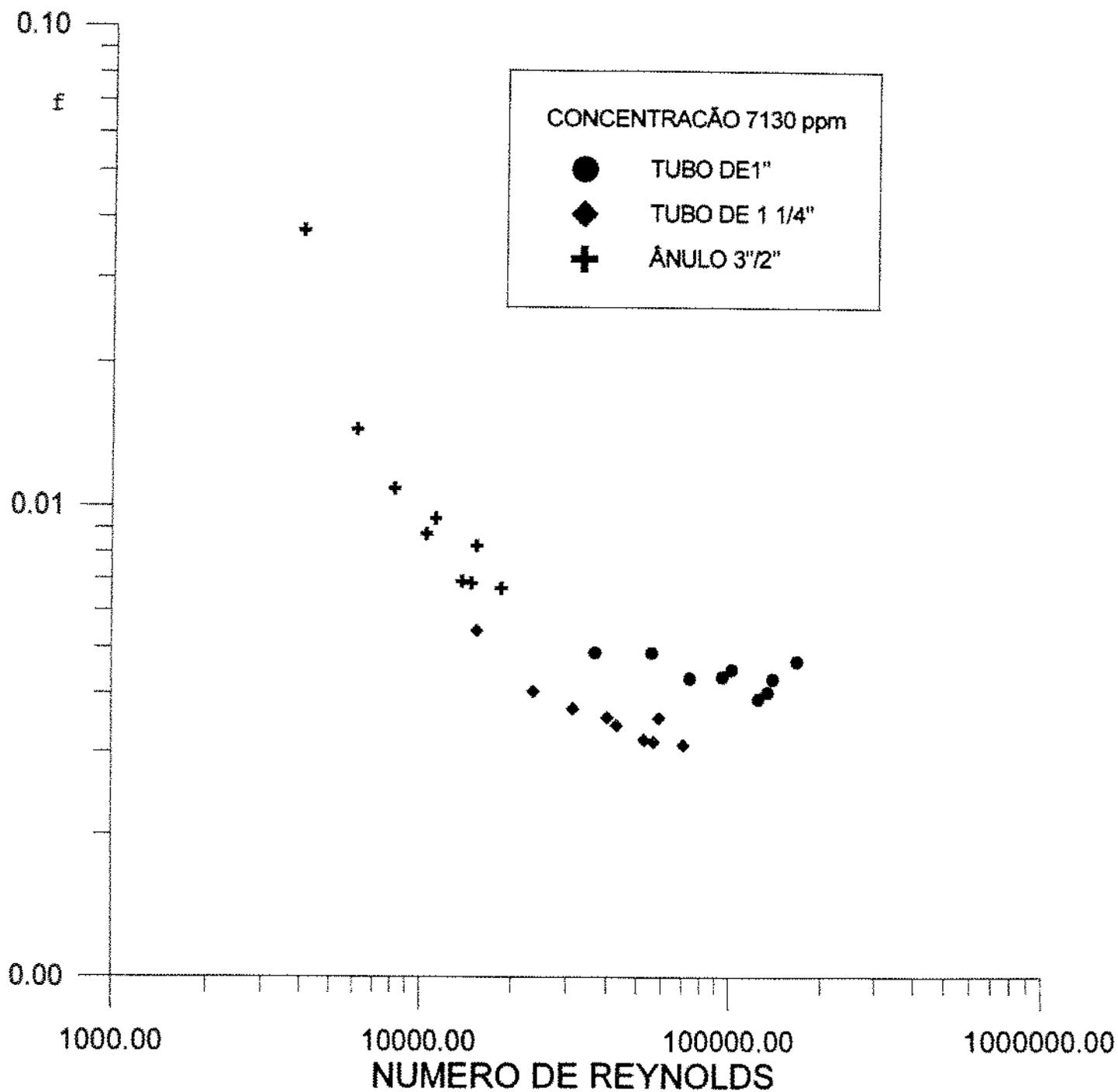


Figura 4.46 Gráfico $f \times Re_{RS}$: dados experimentais para a concentração de 7130 ppm, para os tubos de 1" (2,54 cm), 1 1/4" (3,18 cm) e anular 3"/2"

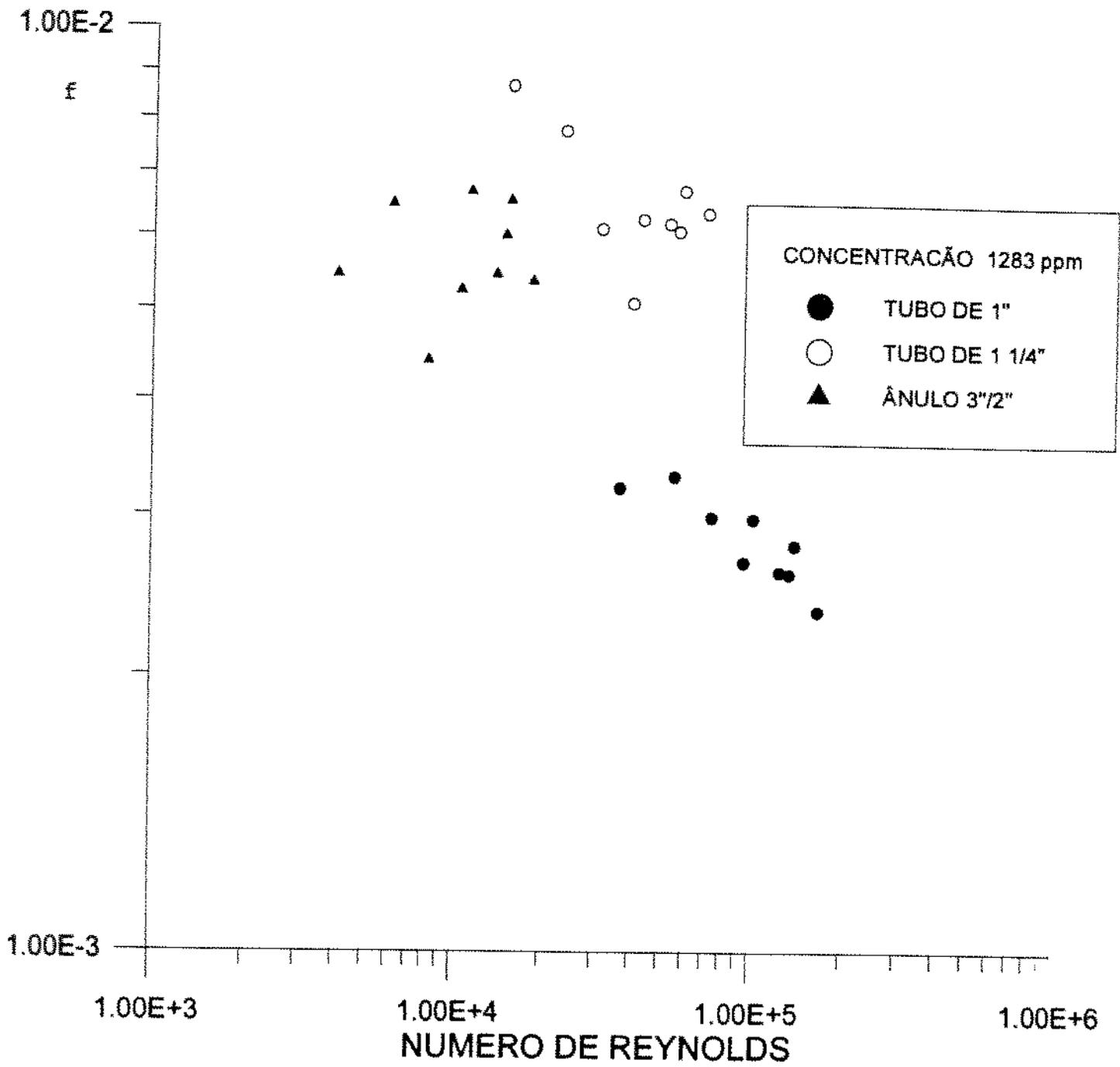


Figura 4.47 Gráfico $f \times Re_{RS}^*$: efeito do diâmetro, usando a concentração de 1283 ppm

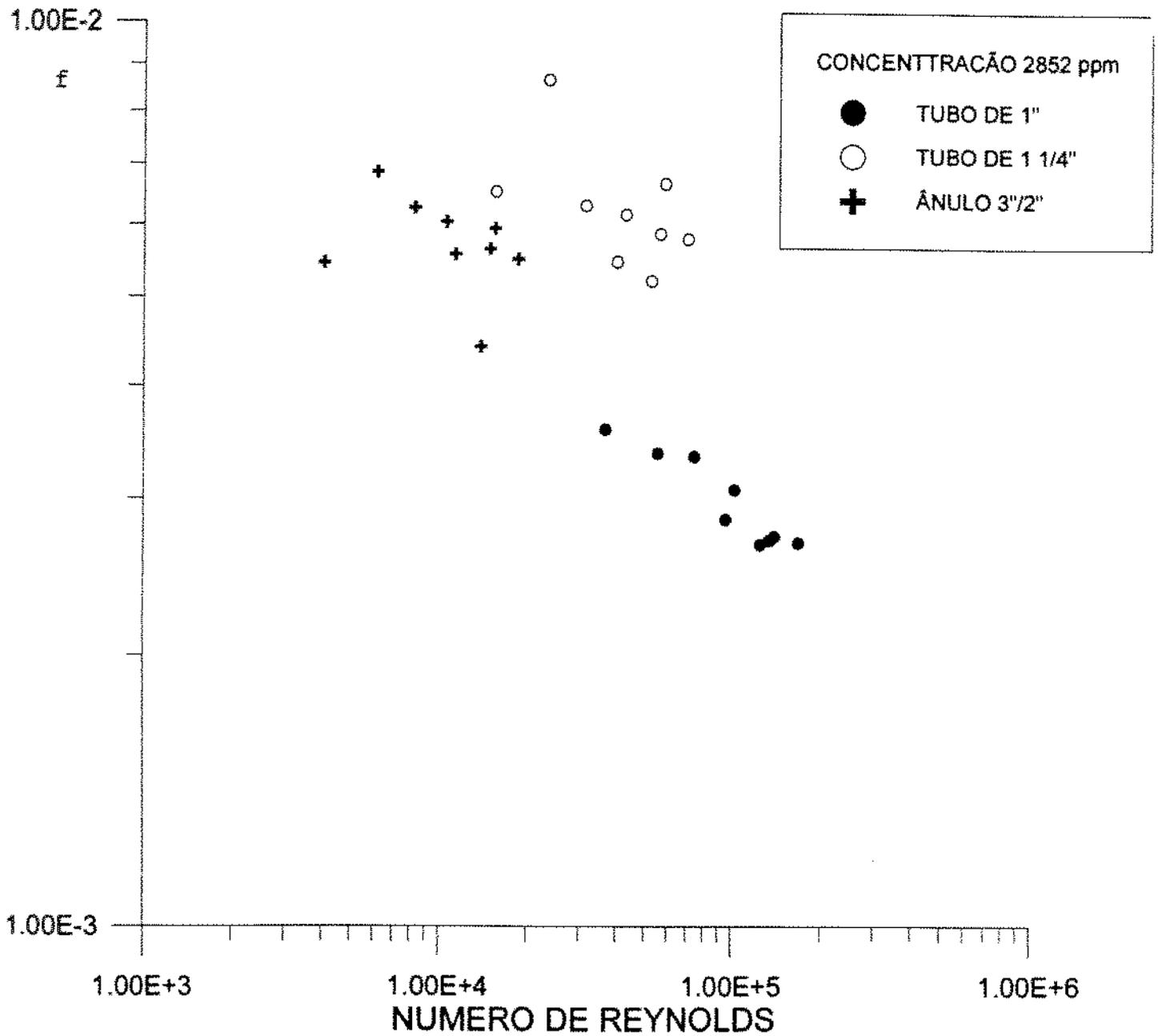


Figura 4.48 Gráfico $f \times Re_{RS}^{-1}$: efeito do diâmetro, usando a concentração de 2852ppm

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

O presente trabalho objetivou estudar o comportamento reológico e o escoamento tubular e anular de uma suspensão argilosa com composição semelhante à de um fluido de perfuração real. Para o estudo reológico foram realizadas medidas em um viscosímetro Fann, que permitiram a obtenção da curva tensão de cisalhamento versus taxa de deformação, que caracteriza reologicamente o fluido. Esses dados foram tratados através do programa Rheocalc, que resultou no ajuste dos dados para diversos modelos reológicos propostos na literatura. Foi obtido que o fluido utilizado segue o modelo a três parâmetros com tensão residual, conhecido como modelo de Robertson-Stiff, sendo o ajuste satisfatório com coeficiente de correlação igual a 0,9941, desvio padrão igual a 0,8941 e desvio médio igual a 0,000 em relação à curva experimental. Portanto, para o fluido de perfuração utilizado:

$$\tau = 0,893(\dot{\gamma} + 123,506)^{0,535} \quad (5.1)$$

Os escoamentos tubular e anular envolveram medidas de diferencial de pressão-vazão, que geraram gráficos f versus Re_{RS} , mostrados nas figuras 4.9 a 4.15; 4.23 a 4.26 e 4.33 a 4.39. Verificou-se um comportamento tipo Blasius do fator de atrito em função do número de Reynolds generalizado, e foram obtidas as seguintes correlações:

$$\text{Para o tubo de 2,54 cm: } f = \frac{0,346}{(Re_{RS})^{0,383}}$$

$$\text{Para o tubo de 3,18 cm: } f = \frac{0,0933}{(\text{Re}_{RS})^{0,218}}$$

$$\text{Para o anular 7,62/5,08 cm: } f = \frac{0,407}{(\text{Re}_{RS})^{0,402}}$$

As variações observadas nas constantes das correlações acima, indicam que estas são funções do diâmetro da tubulação e, comparando-se com outros autores, verificou-se que as constantes, para um mesmo diâmetro de tubo, variam com as propriedades reológicas do fluido.

Uma segunda fase do trabalho envolveu o estudo da reologia e dos escoamentos tubular e anular do fluido de perfuração, com adição de variadas concentrações de poliacrilamida hidrolisada, na faixa de 713 a 7133 ppm.

Observou-se tanto para os escoamentos tubular quanto anular, que o fenômeno de redução de fricção alcança maiores percentuais entre as concentrações 1141 e 1283 ppm. Além disso, a funcionalidade da poliacrilamida hidrolisada como redutora de fricção, para o solvente usado, limita-se à faixa de concentração 713 e 2853 ppm. Sendo que acima de 2853 ppm ocorreram valores muito baixos de redução de fricção.

Observações dos valores da redução de fricção com a variação da concentração, para um dado número de **Reynolds**, mostraram que houve decréscimo de redução de fricção com a concentração tanto para o tubo de 2,54 cm quanto para o anular, entretanto uma clara tendência não foi percebida para o tubo de 3,18 cm.

Para a variação crescente do número de **Reynolds** dos escoamentos tubular e anular estudados neste trabalho (mantendo-se fixa a concentração), percebeu a tendência de queda nos percentuais de redução da fricção sendo mais acentuada na geometria anular que na tubular. Entretanto, para a geometria tubular a tendência foi mais acentuada no tubo de 2,54 cm. Isso leva à conclusão que o processo de degradação do polímero, presente no solvente, foi mais crítica na geometria anular que na tubular, e que cresce com a diminuição do diâmetro, na geometria tubular.

Portanto, este trabalho experimental mostrou que ocorre o fenômeno de redução de fricção com adição de poliacrilamida hidrolisada em relação ao fluido de perfuração. Entretanto, essa redução é mais pronunciada numa determinada faixa de concentração e para números de **Reynolds** elevados. Em tubulações menores, no caso, 1" e **Re** muito elevados foram observados efeitos de degradação do polímero.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Os dados preliminares e inéditos obtidos neste estudo sugerem o prosseguimento da pesquisa através da obtenção de novos dados para concentrações de poliacrilamida entre 1426 e 2282 ppm, em tubulações com diâmetros acima de 2,54 cm e número de **Reynolds** intermediários, de maneira a se estabelecer condições ótimas de redução de fricção. A mesma proposta vale para escoamento anular.

Seguindo a linha de pensamento proposto por Kwack [36], e sabendo que o fluido de perfuração com poliacrilamida hidrolisada tem comportamento viscoelástico, efetuar um estudo para o fator de atrito como função do número de **Reynolds** e do número de Weissenberg, que caracteriza a viscoelasticidade. Como esse número deve variar com a concentração de poliacrilamida adicionada ao fluido, a correlação equivale a encontrar uma função do número de **Reynolds** e concentração.

Referências Bibliográficas

- [1] -Astarita, G.; Nicodemo, L.; Velocity Distributions and Normal Stress in Viscoelastic Turbulent Pipe Flow; A. I. Ch E. Journal,12(3),pp. 478-484, may 1966.
- [2] -Ataide, C. H.; Escoamento em Tubos de Suspensões com Comportamento Não-Newtoniano; Tese de Mestrado,Universidade Estadual Campinas,Campinas, 1985.
- [3] -Baijal,S. K.;Flow Behaviour of polymers in porous media,Pennwell Books,Tulsa,1982.
- [4] -Bailey, F. E.; Koleske, J. V.; Configuration and hydrodynamic properties of the poly oxyethylene chain in solution, in non-ionic surfactants (ed. Shick and Martin), Dekker Publishers Inc., New York, 1967.
- [5] -Barnes, H. A.; Hutton, J. F.; Walters, K.; An Introduction to Rheology, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [6] -Beirute, R. M.; Flumerfelt, R. W.; An Evaluation of teh Robertson-Stiff Model Describing Rheological Properties of Drilling Fluid and Cement Slurries, Spe Journal, Vol. 14(2), pp.. 97-100, 1977.
- [7] -Berman,N.S.;Flow time scales and drag reduction,Ph. Fluids,10,10(ii),pp. S168-s174,1977.
- [8] -Berner, C.; Scrivener,O.; Drag reduction structure of turbulence in dilute polymer solutions, Prog. Astronautics and Aeronautics, 72, Viscous Flow Drag Reduciton, AIAA, pp. 290-299, 1980.
- [9] -Bird, R. B; Armstrong, R. C.; Hassager, O.; Dynamics of Polymeric Liquids, 2nd Ed., Vol. 1, J. Wiley & Sons, New York, 1987.

- [10]-Borger, V.D.; Yeow, Y.L.; Fluid Mechanics, in: Ullmann, ... Fritze Gerhartz, Wolfgang III (eds.), Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry, V C H Publishers Ltd, New York, vol. B1, pp. 5.1-5.49, 1990.
- [11]-Bourgoyne Jr., A. T.; Milheim, K. K.; Chenevert, M. E.; Young Jr., F. S.; Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series, Vol. 2, 1991.
- [12]-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, Journal of Rheology, 24(5), pp. 603-623, october, 1980.
- [13]-Cheremisinoff, Nicholas P.; Fluid flow pocket handbook, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA, 1984.
- [14]-Crane Co, Engineering Division ; Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe, Chicago, USA, 1957.
- [15]-De Paula, José Luiz; Escoamento Laminar e Turbulento de Soluções Poliméricas de Hidróxipropilguar em Tubos, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.
- [16]-Dodge, D. W. and Metzner, A. B.; Turbulent of Non-Newtonian Systems, A. I. Ch. E. Journal, 5(12), 189-203, June 1959.
- [17]-Durst, F.; Rastog, A. K.; Calculations of Turbulent Boundary-Layer Flow with Drag-Reducing Polymer Additives, Ph. Fluids, 20 (12), pp. 1975-1985, 1977.
- [18]-Elato, C.; Tirosh, J.; Frictional Drag Reduction, Israel Journal of Technology, 3, pp.1-6, 1965.
- [19]-Ernst, W. D.; Investigation of The Turbulent Shear Flow of Dilute Aqueous CMC Solutions, A. I. Ch E. Journal, 12, pp. 581-586, 1966.
- [20]-Exlog Series; Theory and Application of Drilling Fluid Hydraulics, D. Reidel Publishing Company, Houston, 1985.

- [21]-Fabula, A. G.; An experimental Study of Grid Turbulence in Dilute High-Polymer Solutions, Ph. D. Thesis, Pennsylvania State University, 1966.
- [22]-Fabula, A. G.; The Toms Phenomenon in the Turbulent Flow of Very Dilute Polymer Solutions; in: Lee, E. H. (ed) Proceedings Fourth International Congress on Rheology (August 26-30, 1963), part.3, (Lee, E. H., Ed.), Interscience Publishers, New York, pp 455, 1965.
- [23]-Falco, R. E.; Wiggert, D. C., Effects of dilute solution on vortex ring/wall interactions - a mechanism for drag reduction; Prog. Astronautics and Aeronautics, 72, Viscous Flow Drag Reduction, (AIAA), pp. 275-289, 1980.
- [24]-Ferry, J. D.; Viscoelastic Properties of Polymers, 2nd Ed., J. Wiley & Sons, New York, 1970.
- [25]-Gadd, G. E.; Friction Reduction in Encyclopedia of Polymer Science and Technology, New York, Interscience Publishers, 15, pp 224-253, 1971.
- [26]-Govier, G. W.; Aziz, K.; The flow of complex mixtures in pipes, Van Nostand Reinhold Company, New York, 1972.
- [27]-Hansen, R. J.; Measurements to Elucidate the Mechanism of Drag Reduction; Proc. Symp. Turbulence in Liquids, Missouri - Roulla (Ed. Zakin and Patterson), pp. 85-89, 1971.
- [28]-Hawkrige, H. R. J.; Gadd, G. E.; Investigation of drag reduction by certain algae, Nature, 230 (5291), pp 253-255, March 26, 1971.
- [29]-Hayes, J. W.; Hutton, J. F.; The Effect of Very Dilute Polymer Solutions on the Formation of Taylor Vortices; Comparison of Theory with Experiment, Prog-Heat and Mass Transfer, Pergamon Press, 5, pp. 195-209, 1972.
- [30]-Hele-Shaw, H. S.; Experiments on nature of the surface resistance in pipes and on ships, Trans. Inst. Nav. Architects, 39, pp. 145-156, 1897.

- [31]-Hoyt, J. W.; Soli, G.; Algal cultures: ability to reduce turbulent friction in flow, *Science*, 149 (3691), pp 1509-1511, September 24, 1965.
- [32]-Hoyt, J. W.; Fabula, A. G., The Effect of Additives on Fluid Friction, US Naval Ordnance Test Station, Nots-Tp-3670, December, 1964.
- [33]-James, D. F.; Laminar flow of dilute polymer solutions around circular cylinders; Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, 1967.
- [34]-Jen-Yuan, Chien; Determination of molecular weights of high polymer, Israel program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963.
- [35]-Kohn, M. C.; Energy storage in drag-reducing polymer solutions; *J. Polymer Sci; Polymer Physics*, 11, pp. 2339-2356, 1973.
- [36]-Kwack, Eug-Yun; Effect of Weissenberg Number on Turbulent Heat Transfer and Friction of Viscoelastic Fluids, University of Illinois at Chicago, Ph. D. Thesis, Chicago 1983.
- [37]-Landahl, M. T.; Bark, F. H.; Application of a Two-Scale Boundary Layer Turbulence Model to Drag Reduction, *Colloques Int. CNRS 233, Polymères et Lubrification*, Brest, pp. 249-258, 1974.
- [38]-Little, R. C.; Aluminium Disoaps as Drag-Reducing Agents; *Nature Physical Sciences*, 245, pp. 141-142, October 29, 1973.
- [39]-Lumley, J. L.; 5th Symp. Naval Hydrodynamics, Ship Motions and Drag Reduction (Bergen, Norway), (Sponsored by U. S. Office Naval Res.), ACR-112, pp 915-946, September 10-12, 1964.
- [40]-Lumley, J. L.; Drag reduction in turbulent flow by polymer additives; *Journal Polymer Sci, Macromolecular Reviews*, 7, pp. 283-290, 1973.
- [41]-Maegava, Lídia Maria; Escoamento de Soluções Poliméricas: A Redução do Arraste; Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1986.

- [42]-Marquadt, D. W.; Nonlinear model, *Journal soc. ind. app. l. math.*, vol., pp. 431-441, 1963.
- [43]-Marques de Sá, Carlos Henrique; Avaliação Experimental dos Efeitos de Parede, da Concentração de Partículas e da Reologia em um escoamento Axial Anular Sólido - Fluido Não-Newtoniano; Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.
- [44]-Martins, André Leibson; Marquês de Sá, Carlos Henrique; Efeitos de Redução do Atrito na Circulação de Fluidos de Perfuração à Base de Poliacrilamida; Comunicação Interna nº 001/93, CENPES/PETROBRÁS, 1993.
- [45]-Merrill, E. W.; Smith, K. A.; Shin, H.; Mickley, H. S., Study of turbulent flow of dilute polymer solutions in a couette viscometer, *Trans. Soc. of Rheology*, 10 (1), pp. 335-351, 1966.
- [46]-Metzner, A. B.; Vaseleski, R. C.; Drag Reduction in the Turbulent Flow of Fiber Suspensions, *A. I. Ch. E. Journal*, 20 (2), pp. 301-306, March, 1974.
- [47]-Metzner, A. B.; Reed, J. C.; Flow of Non-Newtonian Fluids - Correlation of the Laminar Transition and Turbulent Flow Regions; *A. I. Ch. E. Journal*, 1(4), Dec. 1955.
- [48]-Metzner, A. B.; Polymer solution and fiber suspension rheology and their relationship to turbulent drag reduction; *Ph. Fluids*, 20, 10 (ii), pp. S145-S149, 1977.
- [49]-Meyer, W. A.; A Correlation of Frictional Characteristics for Turbulent Flow of Dilute Viscoelastic Non-Newtonian Fluids in Pipes; *A. I. Ch. E. Journal*, Vol. 12, pp. 522-525, 1966.
- [50]-Mysels, K. J., United States Patent Spec. 2492173, December 27, 1949.
- [51]-Ohen, H. A.; Program Helps Friction Factor for Non-Newtonian Fluid Flow; *Oil & Gas Journal*, pp. 44-47, 1989.
- [52]-Ollis, M. The scaling of drag-reduction turbulent pipe flow; Ph. D. Thesis, University of Bristol, 1981.

- [53]-Paixão, Ana eleonora Almeida; Escoamento Anular de Fluidos Não-Newtonianos Utilizando Modelo Reológico a Três prâmetros; Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas,Campinas, 1990.
- [54]-Paterson, R. W. e Abernathy, F. H. ; Turbulent Flow Drag Reduction with Dilute Polymer Solutions, *Journal of Fluid Mechanical*, 43 (4), pp. 689-710, 1970.
- [55]-Patterson, G. K.; Florez, G. L; Velocity Profiles During Drag Reduction; Viscous Drag Reduction, Wells, C. S. (ed.), Plenum Press, New York, pp. 233-250, 1969.
- [56]-Poreh, M; Dimant, Y., Velocity Distribution and Friction Factors in Pipe Flows with Drag Redution, Technion IIT, Report nº175, 1972.
- [57]-Preince,J.H.;Measurements in Rheology of foodstuff,Elsevier Applied Science Company,London,1984.
- [58]-Pruitt, G. T.; Crawford, H. R.; Simons, C. M.; Neil, G. H.; A Method to Minimize Costs of Pumping Fluids Containing Friction Reduction Additives, SPE Paper nº SPE997, 1964.
- [59]-Robertson, R. E.; Stiff Jr., H. A.; An Improved Mathematical Models for Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Ciment Slurries; *SPE Journal*, Vol. 16 (1), pp 31-36, 1976.
- [60]-Savins ,J.G. ;A stress-controlled drag reductionphenomenon,*Rheologica Acta*,6(4),pp. 323-330,1967.
- [61]-Savins, J. G.; Drag Reduction Characteristics of Solutions of Macromolecules in Turbulent Pipe Flow, *SPE Journal*, 203-214, September 1964.
- [62]-Schwarz, W. H.; Friehe, C. A.; The Use of Pitot-Static Tubes and Hot-film anemometers in dilute polymer solutions; *Viscous Drag Reduction*, Wells, C. S. (Ed.), Plenum Press, New York, pp. 281-296, 1969.

- [63]-Sellin, R. H. J.; Hoyt, J. W.; Scrivener, O.; Fluid flows and their industrial applications-part 1: basic aspects, *Journal of Hydraulic Research*, 20(1), pp. 29-67, 1982.
- [64]-Seyer, F. A.; Metzner, A. B.; Turbulence Phenomena in Drag Reducing Systems, *A. I. Ch. Journal*, 15, pp. 426-434, 1969.
- [65]-Shaver, R. G.; Merrill, E. W.; Turbulent flow of pseudoplastic polymer solutions in straight cylindrical tubes, *A. I. Ch. E. Journal*, 5 (2), pp. 181-188, June, 1959.
- [66]-Shenoy, A. V.; Talathi, M. M. Turbulent Pipe Flow Velocity Profile Model for Drag Reducing Fluids; *A. I. Ch. E. Journal*, 12, pp. 581-586, 1966.
- [67]-Shenoy, A. V.; Shintre, S. N.; Developing and fully developed turbulent flow of drag reducing fluids in an annular duct; *Can. J. Chem. Eng.*, 64, pp. 190-195, 1986.
- [68]-Shin, H.; Reduction of drag in turbulence in drag-reducing systems; *A. I. Ch. E. Journal*, 15 (3), pp. 426-434, 1969.
- [69]-Silva, M. G. Pena; Simulador de Fluxo Vertical, Horizontal e Inclinado, *Ciência Técnica Petróleo - Seção Perfuração 1*; pp. 79-93, Rio de Janeiro, 1987.
- [70]-Skelland, A. H. P.; *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*; John Wiley and Sons, New York, 1967.
- [71]-Slanec, K; Mechanical Degradation of Dilute Solutions of Drag-Reducing Polymer in Pipe Inlets, *Acta Polytechnica, CVUT Prague*, 1, pp. 49-60, 1978.
- [72]-Spalding, D. B., A model and calculation procedure for the friction and heat transfer behaviour of dilute polymer solutions in turbulent pipe flows; *Progr. Heat and Mass Transfer*, Pergamon Press, 5, pp. 275-284, 1972.
- [73]-Tanner, Roger I.; *Engineering Rheology*, Oxford University Press, London, UK, 1988.
- [74]-Tiederman, N. G.; Reischman, Calculation of Velocity profiles in drag-reducing flows; *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, 98, pp. 553-566, 1976.

- [75]-Ting, Robert y.; Oh-Kil; Drag reduction Properties of ultra-high-molecular-weight polyacrylamide and related polymers, in: Bikales, N.M. (ed); Water -soluble polymers, Plenum press, new york, pp..151-159, 1973.
- [76]-Tom, B. A.; Detection of a wall effect in laminar flow of solutions of linear polymer, J. Colloid Sci, 4(5), pp.. 511-521, October, 1949.
- [77]-Virk, P. S.; Drag Reduction Fundamental, A. I. Ch. E. Journal, 21(4), pp. 625-656, July 1975.
- [78]-Virk, P. S.; Mickley, H. S.; Smith, K. A.; The Ultimate Assymptote and Mean Flow Structure in Tom's Phenomenon, Journal of Applied Mechanics, 37, Trans. ASME, 92, series E, nº 2, p. 488, June, 1970.
- [79]-Virk, P. S. et alii ;The Toms Phenomenon: Turbulent Pipe Flow of dilute Polymer Solutions, Journal of Fluids Mechanics, 30 (2), pp.. 305-328, 1967.
- [80]-Walsh, M.; Theory of Drag Reduction in dilute high-polymer flow; Intern. Shipbuildin Progress, 14 (152), pp.. 134-139, 1967.
- [81]-Walters, K.; Rheometry: industrial applications, John Wiley and Sons Ltd, New York, 1980.
- [82]-Wells, C. S.; Anomalous Turbulent Flow on Non-Newtonian Fluids, A. I. A. A. J., 3, pp.. 1800-1805, 1965.
- [83]-White, A.; Heat Transfer Characteristics of Dilute Polymer Solutions in Fully Rough Pipe Flow, Nature, 229, 5257, pp.. 486-487, August 1, 1970.
- [84]-White, A.; Hemmings, J. A.; Drag Reduction by Additives: A Review and Bibliography; Bhra Fluid Engineering, UK, 1976.
- [85]-Whorlaw, R. W.; Rheological Techniques; Ellis Horwood, London, 1980.
- [86]-Yang, T. M. T.; Kieger, I. M.; Comparison of Methods for Calculating Shear Rates in Coaxial Viscometers, Journal of Rheology, 22(4), 413-421, 1978.

Abstract

This work is an experimental study of drag reduction phenomenon in the salt drilling fluid that contains hydrolyzed polyacrylamide and flows in 1", 1¼" tubes and 3"/2" annulus, by turbulent flow.

The rheological behavior of the salt drilling fluid with hydrolyzed polyacrylamide in concentration between 0 and 7133 pp.m was analyzed. It was verified that the model proposed by Robertson-Stiff well describes the rheological behavior of the salt drilling fluids in the total range considered.

Experimental results for the turbulent flow in the pipes and in the annulus were used to analyze the drag reduction phenomenon, by studying the influence of the geometry, mechanical degradation, etc, in the friction factor of the drilling fluids. Empirical correlations (Blasius type) were developed from experimental data for turbulent flow of the solvent (salt drilling fluid without hydrolyzed polyacrylamide) for tubes and annulus.

The drag reduction phenomenon was observed and quantified for the analyzed concentration ranges of hydrolyzed polyacrylamide. Also, it was studied the influence of this polymer's mechanical degradation from a qualitative viewpoint

It was noted that the function of hydrolyzed polyacrylamide like drag reducer for salt drilling fluid ranges from 713 to 2853 ppm. However, the highest drag reduction percentage was gotten for concentration in the range 1141 and 1426 ppm.

Apêndice A

Tabelas A.1 Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o tubo de 1"

TUBO 2,54 cm						
Número de Reynolds	Concentração 713 ppm		Concentração 1141 ppm		Concentração 1284 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
19283	0.009017531	-85.00	0.004007791	40.00	0.002671861	60.00
36969	0.005880813	1.04	0.003157068	46.87	0.003218971	45.83
56056	0.004397361	17.28	0.002592674	51.23	0.003314428	37.65
74916	0.003711899	23.54	0.002699417	44.40	0.002994666	38.31
95953	0.003036694	29.77	0.002342592	45.82	0.002675183	38.13
118012	0.003283227	24.02	0.002478641	42.64	0.002984751	30.93
126021	0.002700696	27.44	0.002252170	39.49	0.002614808	29.74
135407	0.002728439	26.83	0.002429080	34.86	0.002600142	30.28
140689	0.002719017	30.80	0.002614129	33.47	0.002791632	28.95
169029	0.002073694	35.85	0.002220072	31.32	0.002366451	26.39

TUBO 2,54 cm						
Número de Reynolds	Concentração 1569 ppm		Concentração 1712 ppm		Concentração 1854 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
19283	0.002838852	57.50	0.002671861	60.00	0.003005843	55.00
36969	0.003590391	39.58	0.003714198	37.50	0.003280874	44.79
56056	0.003314428	37.65	0.003314428	37.65	0.003051900	42.59
74916	0.003163380	34.84	0.003015755	37.88	0.002952487	39.18
95953	0.002747485	36.45	0.002631801	39.13	0.002573959	40.47
118012	0.002971774	31.23	0.002984751	30.93	0.002764140	36.04
126021	0.002538463	31.79	0.002528920	32.05	0.002481204	33.33
135407	0.002651461	28.90	0.002574483	30.96	0.002531717	32.11
140689	0.002888452	26.49	0.002767427	29.57	0.002735154	30.39
169029	0.002488433	23.02	0.002366451	26.79	0.002360352	26.98

TUBO 2,54 cm						
Número de Reynolds	Concentração 2145 ppm		Concentração 2282 ppm		Concentração 2853 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
19283	0.003005843	55.00	0.002671861	40.00	0.003673809	45.00
36969	0.003218971	45.83	0.003714198	37.50	0.00390391	39.58
56056	0.003051900	42.59	0.003347245	37.04	0.003380061	36.42
74916	0.002804863	42.22	0.002994666	38.31	0.003353182	30.93
95953	0.002313672	46.49	0.002718564	37.12	0.002848708	34.11
103012	0.002777117	35.74	0.002971774	31.23	0.003075592	28.83
126021	0.002305774	35.90	0.002538463	31.79	0.002672066	28.21
135407	0.002514611	32.57	0.002553955	31.51	0.002702779	27.52
140689	0.002719017	30.80	0.002743222	30.18	0.002727086	30.60
169029	0.002293262	29.06	0.002329856	27.92	0.002683604	16.98

TUBO 2,54 cm						
Número de Reynolds	Concentração 4280 ppm		Concentração 4993 ppm		Concentração 5706 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
19283	0.004508765	32.50	0.004508765	32.50	0.004341774	35.00
36969	0.004395134	26.04	0.004580844	22.92	0.004580844	22.92
56056	0.004397361	17.28	0.004397361	17.28	0.004462993	16.05
74916	0.004006947	17.46	0.004217839	13.12	0.004238928	12.68
95953	0.003017558	11.71	0.003918781	9.36	0.004106767	5.02
103012	0.004438196	-2.70	0.004503082	-4.20	0.004399264	-1.80
126021	0.003769522	-1.28	0.003950841	-6.15	0.003807694	-2.31
135407	0.003378474	0.40	0.003900213	-4.79	0.003900213	-4.59
140689	0.004043832	-2.92	0.004195516	-6.78	0.004130970	-5.13
169029	0.003464288	-7.17	0.003555775	-10.00	0.004342559	-34.34

TUBO 2.54 cm		
Número de Reynolds	Concentração 7133 ppm	
	Fator de fricção	% Redução de fricção
19283	0.005009739	25.00
36969	0.004890361	17.71
56056	0.004889603	8.02
74916	0.004323285	10.95
95953	0.004352594	-0.67
103012	0.004503082	-4.20
126021	0.003912666	-5.13
135407	0.004037063	-8.26
140689	0.004308472	-9.65
169029	0.004696307	-45.28

Tabelas A.2. Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o tubo de 1¼"

TUBO de 3.18 cm						
Número de Reynolds Solvente	Concentração 713 ppm		Concentração 1141 ppm		Concentração 1284 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste
8115	0.004413121	86.36	0.001471040	95.45	0.001471040	95.45
15558	0.004907802	74.29	0.003271668	82.86	0.008724981	54.29
23590	0.005203440	58.14	0.004336200	65.12	0.007805160	37.21
31526	0.006687952	34.55	0.004087082	60.00	0.006130623	40.00
40379	0.006623931	25.71	0.003694115	58.57	0.005095332	42.86
43350	0.006744707	29.76	0.004229731	55.95	0.006287438	34.52
53033	0.006136810	27.00	0.004119229	51.00	0.006220877	26.00
56982	0.006027597	27.93	0.004294663	48.65	0.006102942	27.03
59206	0.006965285	21.60	0.004548757	48.80	0.006752062	24.00
71132	0.005157837	36.42	0.003546013	56.29	0.006393570	21.19

TUBO de 3.18 cm						
Número de Reynolds Solvente	Concentração 1712 ppm		Concentração 1569 ppm		Concentração 1854 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste
8115	0.002942080	90.91	0.001471040	95.45	0.008826242	72.73
15558	0.004362491	77.14	0.006543736	65.71	0.009815604	48.57
23590	0.006359759	48.84	0.004914360	60.47	0.010695961	13.95
31526	0.007059505	30.91	0.004458635	56.36	0.010031929	1.82
40379	0.007133444	20.00	0.004331032	51.43	0.009681130	-8.57
43350	0.006688096	9.52	0.004458365	53.57	0.011088756	-15.48
53033	0.007902195	6.00	0.003782965	55.00	0.010424172	-24.00
56982	0.009342775	-11.71	0.003917938	53.15	0.011452434	-36.94
59206	0.010163629	-14.40	0.003909088	56.00	0.013077678	-47.20
71132	0.008220303	-1.32	0.003277376	59.60	0.011282769	-39.07

TUBO de 3,18 cm						
Número de Reynolds Solvente	Concentração 2140 ppm		Concentração 2282 ppm		Concentração 2853 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste
8115	0.008826242	72.73	0.014710403	54.35	0.008826242	72.73
15558	0.004362491	77.14	0.002726557	85.71	0.006543736	65.71
23590	0.004047120	67.44	0.005781600	53.49	0.00672401	30.23
31526	0.005387517	47.27	0.005573294	43.45	0.006316399	30.18
40379	0.004967948	44.29	0.005095332	42.46	0.005477481	30.57
43350	0.005029950	47.62	0.007544926	21.43	0.006173122	35.71
53033	0.004707690	44.00	0.005968678	29.00	0.005212086	38.00
56982	0.005575527	33.33	0.006404322	23.42	0.005876907	29.73
59206	0.006396690	28.00	0.007391731	16.80	0.006680988	24.80
71132	0.005319020	34.44	0.006554752	19.21	0.005802567	28.48

TUBO de 3,18 cm						
Número de Reynolds Solvente	Concentração 4280 ppm		Concentração 4993 ppm		Concentração 5706 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste	Fator de Fricção	% Redução de arraste
8115	0.016181441	50.00	0.011768321	63.64	0.008826242	72.73
15558	0.008724961	54.29	0.004362491	77.14	0.003817179	80.00
23590	0.003578040	69.77	0.004625280	62.79	0.004625280	62.79
31526	0.003715529	63.64	0.004087082	60.00	0.003715529	63.64
40379	0.003368396	62.00	0.003821499	57.14	0.003057199	65.71
43350	0.003543629	63.10	0.004115414	57.14	0.004229731	55.95
53033	0.003194504	62.00	0.004035163	52.00	0.003530767	58.00
56982	0.003842593	54.05	0.004463353	46.85	0.003767248	54.95
59206	0.004264461	52.00	0.004193386	52.80	0.004477683	49.60
71132	0.004083288	49.67	0.004083288	49.67	0.003653468	54.97

TUBO DE 3,18 cm		
Número de Reynolds solvente	Concentração 0,00 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de arraste
8115	0,032362883	-
15558	0,019085896	-
23590	0,012430440	-
31526	0,010217705	-
40379	0,008916830	-
43350	0,009602632	-
53033	0,008406590	-
56982	0,008363291	-
59208	0,00884291	-
71132	0,008112848	-

Tabelas A.3. Fatores de fricção em função do número de Reynolds generalizado e da concentração e percentuais de redução de arraste para o anular de 3"/2"

ANULAR 7.65/5.08 cm						
Número de Reynolds	Concentração 713 ppm		Concentração 1141 ppm		Concentração 1264 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
21223	0.060699851	-3.13	0.011036337	81.25	8.012875726	78.12
40689	0.025228724	-2.78	0.008864146	63.89	0.005454859	77.78
6169	0.013181357	0.00	0.004699053	69.05	0.006506382	57.14
8244	0.011614767	0.00	0.005110489	56.00	0.004413604	62.00
10560	0.009078967	1.72	0.005893365	36.21	0.005256244	63.10
11336	0.009291235	4.41	0.006289452	35.29	0.006718278	30.88
13869	0.007673469	10.98	0.005360916	37.80	0.005466032	36.59
14901	0.007160065	19.15	0.005652683	36.17	0.006029528	31.91
15483	0.008353909	8.74	0.006043253	33.98	0.006576482	28.16
18602	0.006718085	6.54	0.005374469	25.23	0.005374469	25.23

ANULAR 7.65/5.08 cm						
Número de Reynolds	Concentração 1569 ppm		Concentração 1712 ppm		Concentração 1854 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
21223	0.005518168	90.62	0.007357557	87.50	0.007357557	87.50
40689	0.008182289	66.67	0.008182289	66.67	0.006818574	72.22
6169	0.007229313	52.38	0.006506382	57.14	0.006506382	57.14
8244	0.004645899	60.00	0.006271964	46.00	0.005110489	56.00
10560	0.006689765	27.59	0.006052645	34.48	0.005415524	61.38
11336	0.006575336	32.35	0.006432393	33.82	0.004574146	52.94
13869	0.005991612	38.49	0.005466032	36.59	0.004625104	46.34
14901	0.006217951	29.79	0.006312163	28.72	0.004145301	53.19
15483	0.006754224	26.21	0.007109710	22.33	0.004532440	50.49
18602	0.006180639	14.02	0.006583724	8.41	0.004165213	42.06

AMJAR 7.65/5.08 cm						
Número de Reynolds	Concentração 2282 ppm		Concentração 2853 ppm		Concentração 4280 ppm	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
21223	0.007357557	87.50	0.047824125	18.75	0.045984733	21.87
40689	0.005454859	77.78	0.021819436	11.11	0.020455724	16.67
6169	0.006867847	54.76	0.013735695	9.52	0.013374230	11.90
8244	0.006271964	46.00	0.010685568	8.00	0.010685568	8.00
10560	0.006052645	34.48	0.009078967	1.72	0.008282566	10.34
11336	0.005574741	42.65	0.008719466	1.29	0.009148293	5.88
13869	0.004414872	48.78	0.008093932	6.10	0.006727424	21.95
14901	0.005652683	36.17	0.006877431	22.34	0.008384613	5.32
15483	0.005954382	34.95	0.006043253	33.98	0.006576482	28.16
18602	0.00580831	23.36	0.004702660	34.58	0.005240107	27.10

AMJAR 7.65/5.08 cm						
Número de Reynolds	Concentração 4993 ppm		Concentração 5706 ppm		Concentração 0.00 PPM	
	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção	Fator de Fricção	% Redução de Fricção
21223	0.055181688	6.25	0.060699851	-3.13	0.066218020	-12.50
40689	0.023865008	2.78	0.025910580	-5.56	0.037502158	-52.78
6169	0.015904689	-4.76	0.014820093	2.38	0.014458627	4.76
8244	0.011614747	0.00	0.010917863	6.00	0.010917863	6.00
10560	0.009078967	1.72	0.008601127	6.90	0.008760407	5.17
11336	0.008290660	14.71	0.008576526	11.76	0.009434177	2.94
13869	0.006832540	20.73	0.007883700	8.54	0.006937656	19.51
14901	0.006123739	30.85	0.007725334	12.77	0.006877431	22.34
15483	0.005776639	36.83	0.007998423	12.62	0.008265038	9.71
18602	0.004366756	39.25	0.006516543	9.35	0.006718085	6.54

Apêndice B

LISTAGEM DO PROGRAMA GLOBO.C

```

/* calcula reynolds,tw,fator de friccao,percentual de reducao de */
/* friccao e quofric*/
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#define pi 3.14159
#define l 700
#define ro 1.049161
#define d 0.03655
#define a 2.08943
#define b 0.50543
#define con 2.250
void rs(void);
void fris(void);
void perc(void);
void quofric(void);
float dp,w,h,vi,v,va,d2,fris1,ja,jb,tw,ka,kb,f;
double ha,hb,hc,he,hf,hg,hh,hk,hm,hn,rs0,fris0,hp,perc0,quofric0;
FILE *ent,*sai;
main()
{
int i;
sai=fopen("saida30.dat","wt");
ent=fopen("dados1.dat","r");
clrscr();
for(i=1;i<=10;i++)
{
fscanf(ent,"%f",&w);
fscanf(ent,"%f",&dp);
fscanf(ent,"%f\n",&fris1);
h=w*4.0;
f=pi*d*d;
vi=h/f;
v=vi/3600.0;
va=v*100.0;
rs();
fris();
perc();
quofric();
fprintf(sai,"%10.0f",rs0);
fprintf(sai,"%18.9f",fris0);
fprintf(sai,"%5.2f",perc0);
fprintf(sai,"%6.2f",quofric0);
fprintf(sai,"%4.3f\n",con);
}
fclose(sai);
}
/* funcao rs:calcula o reynolds*/
void rs(void)
{
clrscr();
d2=d*100.0;
ha=3.0-b;
hb=2.0-b;

```

```
bc=pow(2,ha);
bc=pow(d2,b);
hf=pow(va,hb);
hg=3.0*b+1.0;
hh=hg/b;
hk=pow(hh,b);
hm=hk*a;
hn=hc*ro*hc*hf;
rs0=hn/hm;

)
/*funcao fris:calcula o fator de friccao*/
void fris(void)
{
clrscr();
ja=dp*d2*980665.0;
jb=4.0*1;
tw=ja/jb;
ka=2.0*tw;
kb=ro*va*va;
fris0=ka/kb;

)
/*funcao perc:calcula o percentual de friccao*/
void perc(void)
{
clrscr();
hp=fris1-fris0;
perc0=(hp/fris1)*100.0;

)
/*funcao quofric:calcula o coeficiente perc/con*/
void quofric(void)
{
quofric0=perc0/con;

)
```

LISTAGEM DO PROGRAMA GLOBAN.C

```

/*calcula reynolds,tw,fator de friccao,percentual de reducao de */
/*friccao e quofric*/
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#define pi 3.14159
#define l 710
#define ro 1.049161
#define d 0.01401
#define a 0.20833
#define b 0.68822
#define con 0.000
void rs(void);
void fris(void);
void perc(void);
void quofric(void);
float dp,w,vi,v,va,d2,fris1,ja,jb,tw,ka,kb;
double ha,hb,hc,he,hf,hg,hh,hk,hm,hn,rs0,fris0,hp,perc0,quofric0;
FILE *ent,*sai;
main()
{
int i;
sai=fopen("saida30.dat","wt");
ent=fopen("dados1.dat","rt");
clrscr();
for(i=1;i<=10;i++)
{
fscanf(ent,"%f",&w);
fscanf(ent,"%f",&dp);
fscanf(ent,"%f\n",&fris1);
vi=523.97*w;
v=vi/3600.0;
va=v*100.0;
rs();
fris();
/*perc();*/
/*quofric();*/
fprintf(sai,"%10.0f",rs0);
fprintf(sai,"%18.9f\n",fris0);
/*fprintf(sai,"%5.2f\n",perc0);*/
/*fprintf(sai,"%6.2f\n",quofric0);*/
fprintf(sai,"%4.3f\n",con);
}
fclose(sai);
}
/* funcao rs:calcula o reynolds*/
void rs(void)
{
clrscr();
d2=d*100.0;
ha=1.0-b;
hb=2.0-b;
hc=pow(12,ha);
he=pow(d2,b);

```

```
hf=pow(va,hb);
hg=2.0*b+1.0;
hh=hp/(3*b);
hk=pow(hh,b);
hm=hk*a;
hn=hc*ro*hc*hf;
rs0=hn/hm;

    }
/*funcao fris:calcula o fator de friccao*/
void fris(void)
{
clrscr();
ja=dp*d2*980665.0;
jb=4.0*I;
tw=ja/jb;
ka=2.0*tw;
kb=ro*va*va;
fris0=ka/kb;

}
/*funcao perc:calcula o percentual de friccao*/
void perc(void)
{
clrscr();
hp=fris1-fris0;
perc0=(hp/fris1)*100.0;

}
/* funcao quofric:calcula o coeficiente perc/con*/
void quofric(void)
{
quofric0=perc0/con;

}
}
```