

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DISSERTAÇÃO**

**ESTUDO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS NÃO-  
NEWTONIANOS EM DUTOS**

**Adelson Belizário Leal**

**2005**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS  
EM DUTOS**

**ADELSON BELIZÁRIO LEAL**

*Sob a Orientação da Professora*

**Cláudia Miriam Scheid**

*e Co-orientação do Professor*

**Luís Américo Calçada**

Tese submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de **Mestre em  
Ciências** em Engenharia Química, Área  
de Concentração Tecnologia Química.

Seropédica, RJ  
Junho de 2005

532.051

L435e

T

Leal, Adelson Belizário, 1977-

Estudo do escoamento de fluidos não-newtonianos em dutos / Adelson Belizário Leal. - 2005.

101 f. : il.

Orientador: Cláudia Miriam Scheid.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia.

Bibliografia: p. 55-58.

1. Tubulação - Dinâmica dos fluidos - Teses. 2. Fluidos não-newtonianos - Teses. 3. Escoamento turbulento - Teses. 4. Resistência de atrito (Hidrodinâmica) - Teses. 5. Reologia - Teses. I. Scheid, Cláudia Miriam, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Tecnologia. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

ADELSON BELIZÁRIO LEAL

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração Tecnologia Química, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, em Engenharia Química.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

---

Cláudia Miriam Scheid, D.Sc., DEQ/IT/UFRRJ  
(Orientadora)

---

André Leibsohn Martins, D.Sc., CENPES/PETROBRAS

---

Carlos Henrique Ataíde, D.Sc., FEQUI/UFU

---

Lúis Américo Calçada, D.Sc., DEQ/IT/UFRRJ

## DEDICATÓRIA

À minha família que nunca economizou esforços e tornou este sonho mais fácil e alegre: **Joaquim e Elza**, meus pais; **Adelina, Adélia, Adeilda e Adeína**, minhas irmãs.

## AGRADECIMENTOS

À professora **Claudia Miriam Scheid** e ao professor **Luís Américo Calçada**, pela orientação, dedicação, amizade, profissionalismo e por todos ensinamentos.

Ao professor **Maurício Cordeiro Mancini**, pela amizade e companheirismo.

Ao professor **Gerson Luiz Vieira Coelho**, pela colaboração com equipamentos necessários na realização deste trabalho.

Ao **Deividson** e a **Tainá**, pela amizade e dedicação na execução dos experimentos.

À minha namorada e amiga **Alessandra Jacinto**, pela dedicação, companheirismo, atenção, compreensão e amor nos momentos mais difíceis. **Muito obrigado!**

Aos Amigos **Jônatas, Serenotti, Bruno, Paulista, Magé, Jameli, Juliano, Ivan, Anelisa, Breno, Teppey, Cidinho, Aline, Leonardo, Alessandra Coelho, Tunala, Emilly, Paulão, Sônia, Mosquito, Hudson, Carlinhos, Matheus, Antônio Crivela, Juscélio, Pica-Pau, Marconi e Antônio Santiago**, pelos ótimos momentos vividos na Rural.

À **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, pelos conhecimentos adquiridos ao longo destes últimos sete anos.

À todos os **profissionais do DEQ-IT/UFRRJ**, pelo suporte técnico e amizade durante a contemplação deste trabalho.

À **CAPES**, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

LEAL, Adelson Belizário. **Estudo do escoamento de fluidos não-Newtonianos em dutos**. Seropédica: UFRRJ, 2005. 101p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química).

O conhecimento da perda de carga no escoamento de fluidos não-newtonianos é muito importante na execução de projetos de tubulação e sistemas de bombeamento. A determinação da perda de carga total envolve o cálculo do fator de atrito correspondente à seção de tubo reto e dos coeficientes de perda de carga dos acidentes presentes no sistema de tubulação. Neste contexto, estudou-se a perda de carga em válvula globo, joelho, redução abrupta e tubo reto liso. Os fluidos usados nos testes foram soluções aquosas de CMC e goma xantana, em diferentes concentrações, escoando em regime turbulento. Os ensaios reológicos foram realizados em um viscosímetro capilar, na mesma temperatura média dos experimentos de perda de carga. Todas as soluções empregadas apresentaram comportamento não-Newtoniano do tipo pseudoplástico. Os dados reológicos foram ajustados pelo modelo de Ostwald-de Waele com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) superiores a 0,99. Os fatores de atrito obtidos experimentalmente foram comparados com os calculados pelas correlações de CLAPP (1961), DODGE & METZNER (1959), SHAVER & MERRILL (1959) e TOMITA (1959). Os coeficientes de perda de carga dos acidentes estudados não foram influenciados de maneira significativa pelas propriedades reológicas do fluido, sendo os valores médios semelhantes aos obtidos para o escoamento da água. Em relação à carga fornecida pela bomba ao fluido, nenhuma influência reológica foi observada e as curvas características obtidas para as soluções poliméricas foram similares à curva para água.

**Palavras chave:** Fator de atrito, coeficiente de perda de carga e carga fornecida pela bomba.

## ABSTRACT

LEAL, Adelson Belizário. **Study of the non-Newtonian fluid flow in ducts.** Seropédica: UFRRJ, 2005. 101p. (Dissertation, Master of Science in Chemical Engineering).

The knowledge of the head losses in the flow of non-Newtonian fluids is important for the execution of pipeline and pumping systems designs. The determination of the total head loss involves the establishment of the friction factor corresponding to the pressure drop in the straight section and the loss coefficients caused by fittings and valves existent in piping systems. In this context, head loss in globe valve, sudden contraction, 90 degree standard elbow and straight smooth circular pipe were studied. The fluids used in the tests were aqueous solutions of carboxymethylcellulose (CMC) and xanthan gum, in different concentrations, in turbulent flow. The rheology was determined by a capillary rheometer, in the same temperature condition of the pressure drop experiments. All solutions employed showed non-Newtonian and pseudoplastic behavior. The rheological data were adjusted for the Ostwald-de Waele model and the correlation coefficients ( $R^2$ ) were above 0.99. The experimental data of friction factor were compared with the predicted by the correlations of CLAPP (1961), DODGE & METZNER (1959), SHAVER & MERRILL (1959) and TOMITA (1959). The loss coefficients of the fittings and valve were not significantly influenced by the rheological properties of the fluid, being the average values similar to the obtained for water. In relation to the head supplied by the centrifugal pump to fluid, no rheological influence was observed and the characteristic curves obtained with the polymeric solutions were the same as the values for pumping of water.

**Key words:** Factor friction, loss coefficient and pump head.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
<b>2.1 O Fluido</b> .....	3
<b>2.2 Aspectos Teóricos sobre o Escoamento de Fluidos</b> .....	5
2.2.1 Perda de carga distribuída.....	5
2.2.1.1 Fator de atrito para fluidos Newtonianos .....	5
2.2.1.2 Fator de atrito para fluidos não-Newtonianos .....	9
2.2.2 Perda de carga localizada .....	14
2.2.2.1 Coeficientes de perda para fluidos Newtonianos .....	18
2.2.2.2 Coeficientes de perda para fluidos não-Newtonianos .....	20
<b>2.3 Bomba Centrífuga</b> .....	20
<b>CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
<b>3.1 Fluidos Utilizados</b> .....	22
3.1.1 Reologia.....	22
<b>3.2 Unidade Experimental</b> .....	24
<b>3.3 Procedimento Experimental</b> .....	25
<b>3.4 Perda de Pressão em Seções Retas e Obstruções</b> .....	26
<b>3.5 Carga Fornecida pela Bomba ao Fluido</b> .....	26
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	27
<b>4.1 Calibração da Unidade Experimental</b> .....	27
4.1.1 Fator de atrito .....	27
4.1.2 Coeficiente de perda .....	29
4.1.3 Carga fornecida pela bomba ao fluido.....	31
<b>4.2 Fluidos não-Newtonianos</b> .....	32
4.2.1 Fator de atrito.....	32
4.2.1.1 Correlação proposta.....	42
4.2.2 Coeficiente de perda .....	44
4.2.3 Carga fornecida pela bomba ao fluido.....	46
<b>4.3 Tratamento das Incertezas Experimentais</b> .....	47
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	54
<b>5.1 Conclusões</b> .....	54
<b>5.2 Sugestões</b> .....	54
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	55

<b>INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES: ANEXOS .....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo I: Dados experimentais para escoamento de fluidos Newtonianos, água</b>	<b>63</b>
<b>Anexo II: Dados experimentais para escoamento de fluidos não-Newtonianos, goma xantana e CMC .....</b>	<b>66</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Modelos reológicos .....	4
<b>Tabela 2.2:</b> Correlações para fator de atrito turbulento de fluidos Newtonianos.....	8
<b>Tabela 3.1:</b> Soluções poliméricas estudadas .....	22
<b>Tabela 3.2:</b> Dados de concentração, temperatura, índice de comportamento, índice de consistência, taxa de cisalhamento, densidade do fluido e coeficiente de correlação.....	24
<b>Tabela 4.1:</b> Coeficientes de perda de carga experimentais e fornecidos na literatura para escoamento de água.....	31
<b>Tabela 4.2:</b> Parâmetros para correlação proposta.....	42
<b>Tabela 4.3:</b> Tratamento estatístico aplicado às correlações testadas para todas as determinações realizadas de goma xantana e CMC .....	44
<b>Tabela 4.4:</b> Coeficientes de perda de carga médio para escoamento turbulento de soluções de goma xantana, CMC e água .....	46
<b>Tabela 4.5:</b> Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do fator de atrito .....	48
<b>Tabela 4.6:</b> Incertezas experimentais propagadas no cálculo do fator de atrito.....	48
<b>Tabela 4.7:</b> Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coeficiente de perda da válvula globo.....	49
<b>Tabela 4.8:</b> Incertezas experimentais propagadas no cálculo do coeficiente de perda da válvula globo.....	49
<b>Tabela 4.9:</b> Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coef. de perda do joelho .....	50
<b>Tabela 4.10:</b> Incertezas exp. propagadas no cálculo do coef. de perda do joelho.....	50
<b>Tabela 4.11:</b> Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coeficiente de perda da redução.....	51
<b>Tabela 4.12:</b> Incertezas experimentais propagadas no cálculo do coeficiente de perda da redução.....	52
<b>Tabela 4.13:</b> Incerteza de cada variável utilizada no cálculo da carga fornecida pela bomba e da vazão volumétrica.....	53

<b>Tabela 4.14:</b> Incertezas experimentais propagadas no cálculo da carga fornecida pela bomba ao fluido e da vazão volumétrica .....	53
<b>Tabela A1:</b> Dados de fator de atrito para água - experimento 1 .....	63
<b>Tabela A2:</b> Dados de fator de atrito para água - experimento 2 .....	63
<b>Tabela A3:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo - água .....	64
<b>Tabela A4:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho de 90° - água .....	64
<b>Tabela A5:</b> Dados de coeficiente de perda para Redução 1-3/4 - água .....	64
<b>Tabela A6:</b> Dados para curva característica da bomba para o escoamento de água-fabricante e experimental.....	65
<b>Tabela B1:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, n=0,965 .....	66
<b>Tabela B2:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, n=0,907 .....	67
<b>Tabela B3:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, n=0,786 .....	68
<b>Tabela B4:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, n=0,579 .....	69
<b>Tabela B5:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, n=0,399 .....	70
<b>Tabela B6:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,921 .....	71
<b>Tabela B7:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,895.....	72
<b>Tabela B8:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,858.....	73
<b>Tabela B9:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n =0,840.....	74
<b>Tabela B10:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,832.....	75
<b>Tabela B11:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,817.....	76
<b>Tabela B12:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,830.....	77
<b>Tabela B13:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,825.....	78
<b>Tabela B14:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,816.....	79
<b>Tabela B15:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,979.....	80
<b>Tabela B16:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,906.....	80

<b>Tabela B17:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,799.....	81
<b>Tabela B18:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,579.....	81
<b>Tabela B19:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,397.....	82
<b>Tabela B20:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,933.....	82
<b>Tabela B21:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,895.....	83
<b>Tabela B22:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,858.....	83
<b>Tabela B23:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,8403 ...	84
<b>Tabela B24:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,832.....	84
<b>Tabela B25:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,817.....	85
<b>Tabela B26:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,830.....	85
<b>Tabela B27:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,825.....	86
<b>Tabela B28:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-goma xantana, n=0,965 ...	86
<b>Tabela B29:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-goma xantana, n=0,907 ...	87
<b>Tabela B30:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-goma xantana, n=0,786 ...	87
<b>Tabela B31:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-goma xantana, n=0,579 ...	88
<b>Tabela B32:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-goma xantana, n=0,397 ...	88
<b>Tabela B33:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,921 .....	89
<b>Tabela B34:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,895 .....	89
<b>Tabela B35:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,858 .....	90
<b>Tabela B36:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,840 .....	90
<b>Tabela B37:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,832 .....	91
<b>Tabela B38:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,817 .....	91
<b>Tabela B39:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,830 .....	92

<b>Tabela B40:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,825 .....	92
<b>Tabela B41:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho-CMC, n=0,8164 .....	93
<b>Tabela B42:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana, n=0,965.	93
<b>Tabela B43:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana, n=0,907.	94
<b>Tabela B44:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana, n=0,786.	94
<b>Tabela B45:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana, n=0,579.	95
<b>Tabela B46:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana, n=0,399.	95
<b>Tabela B47:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,921 .....	96
<b>Tabela B48:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,895 .....	96
<b>Tabela B49:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,858 .....	97
<b>Tabela B50:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,840 .....	97
<b>Tabela B51:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,832 .....	98
<b>Tabela B52:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,817 .....	98
<b>Tabela B53:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,830 .....	99
<b>Tabela B54:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,825 .....	99
<b>Tabela B55:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,816 .....	100
<b>Tabela B56:</b> Dados de vazão e carga fornecida pela bomba–goma xantana.....	100
<b>Tabela B57:</b> Dados de vazão e carga fornecida pela bomba–CMC .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Representação esquemática dos diversos tipos de fluido .....	3
<b>Figura 2.2:</b> Curvas de comportamento para fluidos puramente viscosos e independentes do tempo .....	4
<b>Figura 2.3:</b> Fator de atrito de Fanning para fluidos Newtoniano .....	7
<b>Figura 2.4:</b> Fator de atrito de Fanning para escoamento de fluidos não-Newtonianos .....	11
<b>Figura 2.5:</b> Alguns tipos de acidentes flangeados comuns no sistema de tubulação	14
<b>Figura 2.6:</b> Acidentes de tubulações rosqueados típicos.....	15
<b>Figura 2.7:</b> Válvulas típicas.....	16
<b>Figura 2.8:</b> Perfil de pressão ao longo de segmento reto contendo um acidente ....	16
<b>Figura 2.9:</b> Representação de uma redução concêntrica .....	19
<b>Figura 2.10:</b> Curva característica típica.....	21
<b>Figura 3.1:</b> Viscosímetro capilar .....	23
<b>Figura 3.2:</b> Unidade Experimental .....	25
<b>Figura 4.1:</b> Fator de atrito experimental e predito pela equação de Karman-Nikuradse.....	28
<b>Figura 4.2:</b> Desvio entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de Karman-Nikuradse .....	28
<b>Figura 4.3:</b> Coeficiente de perda para válvula globo-água.....	29
<b>Figura 4.4:</b> Coeficiente de perda para joelho-água. ....	30
<b>Figura 4.5:</b> Coeficiente de perda para redução 1-3/4 - água .....	30
<b>Figura 4.6:</b> Curva característica da bomba centrífuga - experimental e fornecida pela fabricante para escoamento de água .....	32
<b>Figura 4.7:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL - Goma xantana .....	34

<b>Figura 4.8:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL – Goma xantana .....	34
<b>Figura 4.9:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL - CMC.....	35
<b>Figura 4.10:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL - CMC .....	35
<b>Figura 4.11:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER – Goma xantana.....	36
<b>Figura 4.12:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado correlação de DODGE & METZNER – Goma xantana .....	36
<b>Figura 4.13:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER – CMC .....	37
<b>Figura 4.14:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER – CMC.....	37
<b>Figura 4.15:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP – Goma xantana .....	38
<b>Figura 4.16:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP – Goma xantana .....	38
<b>Figura 4.17:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP – CMC.....	39
<b>Figura 4.18:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP – CMC .....	39
<b>Figura 4.19:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA – Goma xantana. ....	40
<b>Figura 4.20:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–Goma xantana.....	40
<b>Figura 4.21:</b> Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–CMC.....	41
<b>Figura 4.22</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–CMC .....	41
<b>Figura 4.23:</b> Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela equação proposta (Equação 4.3) para o escoamento de goma xantana e CMC .....	43
<b>Figura 4.24:</b> Coeficiente de perda para válvula globo–goma xantana e CMC .....	45

<b>Figura 4.25:</b> Coeficiente de perda para joelho 90°–goma xantana e CMC.....	45
<b>Figura 4.26:</b> Coeficiente de perda para redução 1-3/4–goma xantana e CMC .....	46
<b>Figura 4.27:</b> Carga fornecida pela bomba centrífuga aos fluidos poliméricos.....	47

## LEGENDA

### NOMENCLATURA

a e b	Parâmetros da Equação 2.25	-
A, B e C	Funções das propriedades reológicas do fluido	-
c e d	Parâmetros geométricos da tubulação	-
D	Diâmetro interno do tubo	L
$D_h$	Diâmetro hidráulico	L
DMA	Desvio médio absoluto	-
E, F e G	Constantes características de cada acidente (Equação 2.57)	-
f	Fator de atrito de Fanning (Equação 2.16)	-
$f_D$	Fator de atrito de Darcy	-
$f_T$	Fator de atrito de TOMITA (Equação 2.36)	-
g	Aceleração da gravidade	$L/\theta^2$
H	Diferença de altura entre o manômetro e manovacuômetro	L
$H_F$	Carga fornecida pela bomba ou altura manométrica	L
h	Desnível entre as tomadas de pressão	L
$h_d$	Perda de carga distribuída	L
$h_s$	Perda de carga singular ou localizada	L
$h_t$	Perda de carga total	L
k	Índice de consistência	$M/L\theta^{n-2}$
K	Coefficiente de perda de carga	-
$K_1$	Coefficiente de perda de carga relacionado com o diâmetro $D_1$	-
$K_2$	Coefficiente de perda de carga relacionado com o diâmetro $D_2$	-
$K^*$ e $K_\infty$	Constantes da Equação 2.56	-
L	Comprimento do tubo	L
$L_e/D$	Comprimento equivalente	-
$L_f$	Comprimento do acidente	L
n	Índice de comportamento	-
N	Número de determinações experimentais	-
P	Pressão	$M/L\theta^2$
$P_M$	Pressão manométrica no recalque da bomba	$M/L\theta^2$
$P_V$	Pressão manométrica na sucção da bomba	$M/L\theta^2$
R	Raio do tubo	L
$R^2$	Quadrado do coeficiente de correlação	-
Re	Nº de Reynolds	-
$Re_{ap}$	Nº de Reynolds aparente (Equação 2.39)	-
$Re^*$	Nº de Reynolds de KOZICKI (Equação 2.43)	-
$Re_{Cl}$	Nº de Reynolds de CLAPP (Equação 2.34)	-
$Re_{MR}$	Nº de Reynolds de METZNER & REED (Equação 2.30)	-
$Re_{SM}$	Nº de Reynolds de SHAVER & MERRILL (Equação 2.27)	-
$Re_{To}$	Nº de Reynolds de TOMITA (Equação 2.37)	-
T	Temperatura	°C
v	Velocidade média do fluido	$L/\theta$
W	Potência da bomba	$ML^2/\theta^3$
z	Cota	L

$\alpha$	Ângulo de convergência	°
$\beta$	Razão entre diâmetros ( $D_1/D_2$ )	-
$\Delta h$	Diferença de altura de fluido manométrico	L
$\Delta H$	Diferença de cota entre a extremidade inferior do tubo de alimentação de ar e a extremidade inferior do capilar	L
$\Delta P$	Pressão piezométrica	$M/L\theta^2$
$\Delta P_d$	Perda de pressão devido ao acidente projetada na jusante	$M/L\theta^2$
$\Delta P_m$	Perda de pressão ocasionada entre os pontos 1 e 2	$M/L\theta^2$
$\Delta P_o$	Perda de pressão devido ao acidente manifestada no trecho $L_f$	$M/L\theta^2$
$\Delta P_t$	Perda de pressão total devido ao acidente	$M/L\theta^2$
$\Delta P_u$	Perda de pressão devido ao acidente projetada na montante	$M/L\theta^2$
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta do tubo	L
$\varepsilon/D$	Rugosidade relativa do tubo em função do diâmetro do tubo	-
$\varepsilon/R$	Rugosidade relativa do tubo em função do raio do tubo	-
$\gamma$	Taxa de cisalhamento	$\theta^{-1}$
$\gamma_o$	Fator de correção para a taxa de cisalhamento	$\theta^{-1}$
$\gamma_w$	Taxa de cisalhamento na parede	$\theta^{-1}$
$\gamma^*$	Taxa de cisalhamento característica (Equação 3.2)	$\theta^{-1}$
$\eta$	Eficiência da bomba	-
$\mu$	Viscosidade dinâmica ou Newtoniana	$M/L\theta$
$\mu_\infty$	Viscosidade à altas taxas de cisalhamento	$M/L\theta$
$\mu_a$	Viscosidade aparente	$M/L\theta$
$\mu_p$	Viscosidade plástica	$M/L\theta$
$\rho$	Densidade do fluido	$M/L^3$
$\rho_M$	Densidade do fluido manométrico	$M/L^3$
$\sigma$	Desvio padrão	-
$\varphi_i$	Incerteza de cada grandeza medida	à definir
$\tau$	Tensão cisalhante	$M/L\theta^2$
$\tau_o$	Tensão cisalhante crítica	$M/L\theta^2$
$\tau^*$	Tensão cisalhante característica (Equação 3.1)	$M/L\theta^2$
$\tau_w$	Tensão cisalhante na parede do tubo	$M/L\theta^2$

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O transporte de fluidos geralmente é realizado por meio de dutos. Este tipo de transporte é responsável pelo deslocamento de fluidos entre os tanques de estocagem e as unidades de processamento, nas plantas de industriais e entre grandes distâncias

como os minerodutos, oleodutos e gasodutos. Um sistema de tubulação é composto de seções retas, curvas, válvulas dentre outros tipos de acidentes que oferecem resistência ao escoamento. O deslocamento do fluido é promovido por bombas que fornecem energia necessária para que aconteça o escoamento do fluido ao longo do sistema de tubulação. Portanto, no dimensionamento de bombas, é necessário conhecer a perda de carga ocasionada nas seções retas e nos acidentes que compõem o sistema de escoamento. Estes projetos requerem o conhecimento do fator de atrito e do coeficiente de perda de carga para determinar qual a potência da bomba que deve ser utilizada.

De um modo geral, o estudo do escoamento de fluidos newtonianos em dutos encontra-se bastante desenvolvido. Em relação à parte reta da tubulação, na literatura, existem inúmeras correlações implícitas e explícitas para a estimação do fator de atrito, tanto no regime turbulento quanto no regime laminar. Já o coeficiente de perda de carga, para a maior parte dos acidentes, é encontrado em várias tabelas disponibilizadas na literatura.

Para o escoamento de fluidos não-Newtonianos, as correlações encontradas na literatura para a predição do fator de atrito, quase sempre, fornecem valores discordantes ou são específicas a certas características apresentadas pelo fluido e determinadas condições de escoamento. Com relação aos coeficientes de perda, há poucos trabalhos na literatura e a maior parte deles são dedicados ao escoamento em regime laminar.

Os fluidos não-newtonianos apresentam uma relação não linear entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento ou possuem uma tensão crítica para iniciar o escoamento. Podendo ainda, ser dependentes do tempo ou apresentar características viscoelásticas. Nesse sentido, existem vários modelos para a representação da relação entre a tensão cisalhante e taxa de deformação.

Um tipo de fluido bastante comum nos processos industriais é o pseudoplástico. Os fluidos pseudoplásticos apresentam viscosidade aparente decrescente com aumento da taxa de deformação. Como exemplo, pode-se citar: as soluções poliméricas, tintas de impressão, alguns derivados de petróleo, suspensões de minério de ferro e amido, dispersões argilosas e etc.

Neste contexto, este trabalho visa estudar o escoamento de fluidos não-Newtonianos em dutos e avaliar as correlações de fator de atrito disponíveis na literatura, bem como comparar os coeficientes de perda de carga e verificar a influência das propriedades reológicas na carga fornecida por uma bomba centrífuga.

Para realização desses objetivos, dados experimentais de fator de atrito, coeficiente de perda de carga e a carga fornecida pela bomba foram obtidos em escoamento, no regime turbulento, de soluções aquosas de goma xantana e carboximetilcelulose em diversas concentrações.

O estudo desenvolvido será apresentado na forma de capítulos, sendo que;

- No Capítulo 2 é apresentada a revisão de literatura dos trabalhos relacionados com o escoamento de fluidos não-Newtonianos em dutos;
- No Capítulo 3 é descrita a unidade experimental utilizada na obtenção do fator de atrito, coeficiente de perda e carga fornecida pela bomba, assim como, o procedimento experimental adotado neste trabalho;

- Os resultados experimentais são apresentados e discutidos no Capítulo 4;
- O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e as sugestões para etapas futuras.

## CAPÍTULO 2

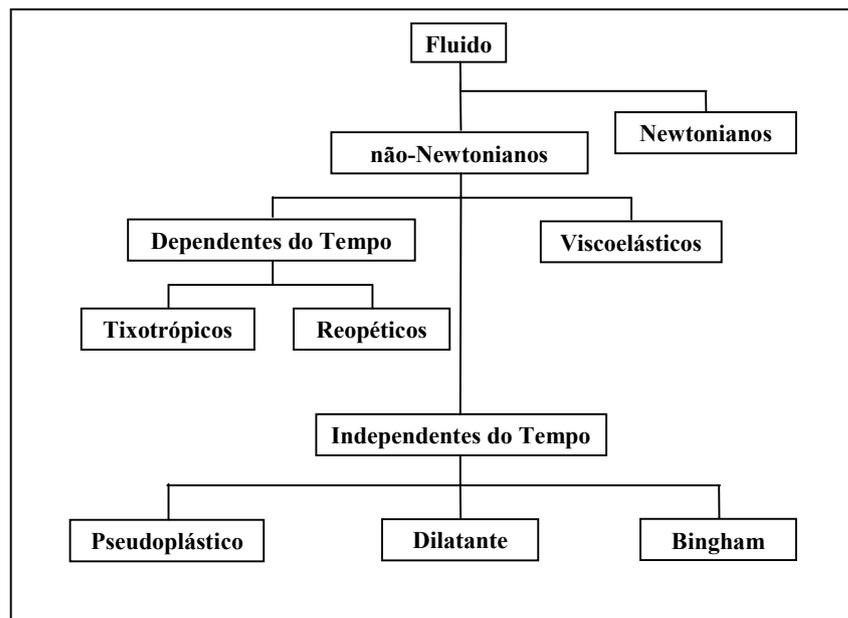
### REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1 O Fluido

Todo fluido cuja relação entre a tensão cisalhante e taxa de deformação não é linear ou requer uma tensão mínima para iniciar a deformação, a uma dada temperatura e pressão é denominado não-Newtoniano. Estes fluidos, geralmente, são divididos em três grandes grupos:

1. Fluidos independentes do tempo ou puramente viscosos: pertencem a este grupo, os fluidos que apresentam taxas de deformação num ponto dependente apenas da tensão cisalhante instantânea aplicada nesse mesmo ponto;
2. Fluidos dependentes do tempo: são aqueles que apresentam viscosidade aparente dependente do tempo de aplicação da taxa de cisalhamento. Esses fluidos são classificados em reopéticos e tixotrópicos. Os tixotrópicos apresentam uma diminuição da viscosidade aparente com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante até alcançar um equilíbrio. Já os fluidos reopéticos têm comportamento oposto. A viscosidade aparente aumenta com o tempo de atuação de uma taxa de cisalhamento constante
3. Fluidos viscoelásticos: são fluidos que apresentam propriedades viscosas e elásticas simultaneamente.

A Figura 2.1 mostra a classificação dos fluidos de acordo com o comportamento reológico



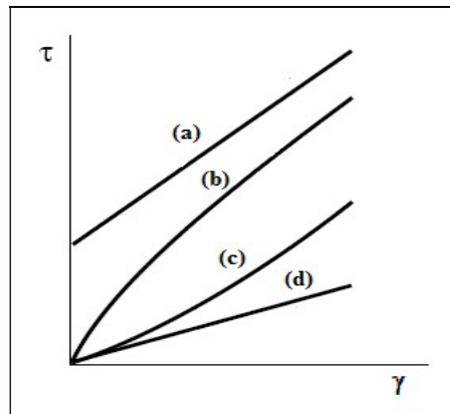
**Figura 2.1:** Representação esquemática dos diversos tipos de fluido.

A maior parte dos fluidos com aplicação na indústria apresenta comportamento referente ao primeiro grupo. Há, na literatura, modelos matemáticos que representam a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, vide Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Modelos reológicos.

Modelo	Equação	Parâmetros
<b>Newton</b>	$\tau = \mu\gamma$ , (2.1)	$\mu$
<b>Bingham</b>	$\tau = \mu_p \gamma \pm \tau_o$ , se $ \tau  > \pm \tau_o$ (2.2a)	$\mu_p$ e $\tau_o$
	$\gamma=0$ , se $ \tau  < \pm \tau_o$ (2.2b)	
<b>Ostwald-de Waele</b>	$\tau = k\gamma^n$ , (2.3)	$k$ e $n$
<b>Buckley-Herschell</b>	$\tau = k\gamma^n + \tau_o$ , (2.4)	$k$ , $n$ e $\tau_o$
<b>Robertson-Stiff</b>	$\tau = k(\gamma + \gamma_o)^n$ , (2.5)	$k$ , $n$ e $\gamma_o$
<b>Casson</b>	$\tau^{0,5} = (\mu_\infty \gamma)^{0,5} + \tau_o^{0,5}$ , (2.6)	$\mu_\infty$ e $\tau_o$

Dentre os diversos modelos capazes de representar as propriedades reológicas dos fluidos, o modelo de Ostwald-de Waele, Equação 2.3, se destaca. Este modelo também chamado de *power law*, embora empírico, é muito utilizado, pois a maior parte dos fluidos não-Newtonianos independentes do tempo com aplicabilidade na indústria apresenta comportamento de potência, numa larga faixa de taxa de deformação. Neste modelo,  $\tau$  é a tensão cisalhante aplicada a fluido e  $\gamma$  é a taxa de deformação, enquanto  $k$  e  $n$  são os índices de consistência e comportamento do fluido, respectivamente. O valor de  $n$  entre 0 e 1 caracteriza os fluidos do tipo pseudoplásticos. Quando  $n$  é maior que 1,0 o fluido é denominado dilatante. Os fluidos Newtonianos apresentam  $n$  iguais à unidade. Neste caso,  $k$  é a viscosidade dinâmica. As curvas que exemplificam estes comportamentos podem ser observadas na Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Curvas de comportamento para fluidos puramente viscosos e independentes do tempo, (a)-Bingham, (b)-Pseudoplástico, (c)-dilatante e (d)-Newtoniano.

Outra maneira de interpretar o comportamento dos fluidos consiste em analisar a variação da viscosidade aparente com taxa de deformação. A viscosidade aparente é definida da mesma forma que a viscosidade Newtoniana, ou seja, a razão entre a tensão cisalhante,  $\tau$ , e a taxa de deformação,  $\gamma$ . No caso de fluidos que podem ser descritos pelo modelo de Ostwald-de Waele, Equação 2.3, a viscosidade aparente é dada por,

$$\mu_a = k\gamma^{n-1}. \quad (2.7)$$

Os fluidos pseudoplásticos representam a maioria dos chamados fluidos não-Newtonianos. Estes fluidos apresentam uma viscosidade aparente que diminui à medida que a taxa de deformação aumenta. Os mecanismos responsáveis por este comportamento são discutidos detalhadamente por SKELLAND (1967) e MACHADO (2002).

## 2.2 Aspectos Teóricos sobre o Escoamento de Fluidos

O escoamento isotérmico e estacionário de um fluido incompressível entre pontos quaisquer, neste caso 1 e 2, pode ser analisado macroscopicamente através da equação de Bernoulli modificada, dada por,

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_F = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t, \quad (2.8)$$

onde  $P_1$  e  $P_2$ ,  $v_1$  e  $v_2$ ,  $z_1$  e  $z_2$  são as pressões, as velocidades médias e as cotas nos pontos 1 e 2, respectivamente.  $H_F$  é a carga fornecida pela bomba,  $h_t$  é o somatório de todas as perdas de carga ocasionadas entre os pontos 1 e 2,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\rho$  é a densidade do fluido.

Experimentalmente a perda de carga total,  $h_t$ , pode ser calculada conhecendo todos os outros termos da Equação 2.8. No entanto, isto não acontece na prática. Geralmente, busca-se determinar a carga requerida à bomba para que fluido seja transportado.

Conforme mencionado acima,  $h_t$  consiste na soma de todas as perdas ocasionadas em um determinado sistema de bombeamento. Incluem-se as perdas provocadas pelo atrito existente na parede da tubulação reta,  $h_d$ , e as perdas de cargas ocasionadas pelos acidentes que compõem um sistema de tubulação,  $h_s$ . Geralmente, este último tipo de perda é devido à sobreposição de dois ou mais efeitos como: mudança na direção ou na área de escoamento e o atrito do fluido com a parede de cada elemento.

### 2.2.1 Perda de carga distribuída, $h_d$

#### 2.2.1.1 Fator de atrito para fluidos Newtonianos

Na hipótese de escoamento horizontal por uma seção de tubo reto com área de escoamento constante, sem bomba e na ausência de qualquer forma de acidentes, a Equação 2.8 pode ser simplificada à:

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = \frac{\Delta P}{\rho g} = h_d. \quad (2.9)$$

Observações experimentais do escoamento turbulento em dutos permitiram obter uma notação funcional para a perda de pressão, dada por,

$$\Delta P = \Delta P(D, L, \varepsilon, v, \rho, \mu), \quad (2.10)$$

onde  $\Delta P$  é a queda de pressão,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $L$  é o comprimento de tubo,  $\varepsilon$  é a rugosidade do duto,  $v$  é a velocidade média,  $\rho$  é densidade do fluido e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. A análise dimensional do problema permite expressar a perda de pressão por meio de grupos adimensionais, por,

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = \phi\left(\frac{Dv\rho}{\mu}, \frac{L}{D}, \frac{\varepsilon}{D}\right). \quad (2.11)$$

Sendo a queda de pressão,  $\Delta P$ , diretamente proporcional a relação  $(L/D)$ , tem-se,

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = \frac{L}{D} \phi_1\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right), \quad (2.12)$$

onde  $\text{Re}$  é o número de Reynolds definido por,

$$\text{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}. \quad (2.13)$$

Introduzindo o número 2 no lado direito da Equação 2.12, isto é possível, pois ainda existe uma função a ser definida, tem-se,

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = 2 \frac{L}{D} \phi_2\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right). \quad (2.14)$$

A função desconhecida,  $\phi_2\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$ , é definida como fator de atrito,  $f$ :

$$f \equiv \phi_2\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right). \quad (2.15)$$

Logo, a queda de pressão ao longo de tubulação reta pode ser dada por,

$$\Delta P = 2\rho f \frac{L}{D} v^2. \quad (2.16)$$

O fator de atrito,  $f$ , é chamado de fator de atrito de Fanning, mas é comum encontrar na literatura a definição do fator de atrito de Darcy,  $f_D$ . No entanto, as duas definições são correlacionadas por  $f_D=4f$ .

A perda de pressão ocasionada no escoamento laminar,  $\text{Re}<2100$ , pode ser calculada facilmente pela correlação de Hagen-Poiseuille, dada por,

$$\Delta P = \frac{32\mu Lv}{D^2}. \quad (2.17)$$

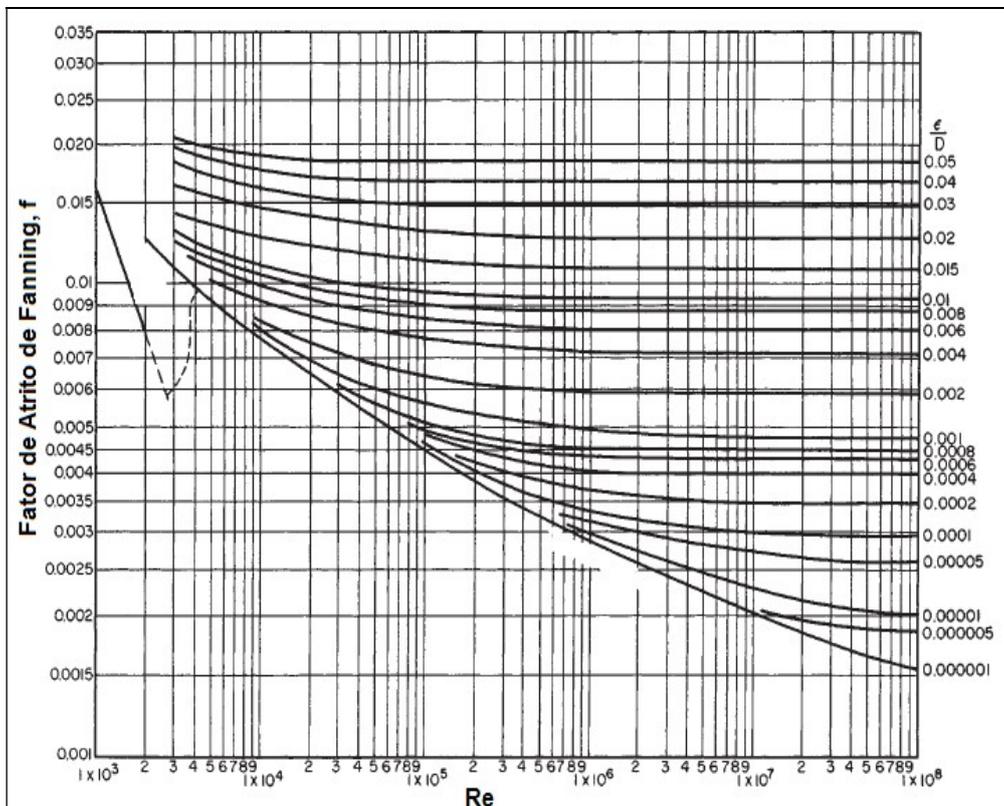
Da igualdade das Equações 2.16 e 2.17 obtêm-se,

$$f = 16/Re. \quad (2.18)$$

No regime laminar, o fator de atrito é dependente apenas do número de Reynolds, ou seja, é independente da rugosidade relativa do duto.

No caso do escoamento turbulento a queda de pressão,  $\Delta P$ , ou a perda de carga,  $h_d$ , não são obtidas facilmente como acontece com o escoamento em regime laminar. Para obter a perda de carga ou pressão é necessário estimar o fator de atrito,  $f$ . Na literatura existem várias correlações para a estimativa do fator de atrito de fluidos Newtonianos tanto em duto liso, como no rugoso. As correlações mais citadas em livros de mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte são mostradas na Tabela 2.2. Nota-se, nesta tabela, que as correlações de von Karman e Nikuradse, para os dois tipos de tubo, são similares. As correlações de von Karman são teóricas enquanto as de Nikuradse são empíricas. Alguns pesquisadores referem-se à Equação 2.22 como correlação de Karman-Nikuradse.

Um método alternativo para determinar o fator de atrito é através do diagrama de Moody, Figura 2.3. MOODY (1944) apresentou graficamente a relação existente entre fator de atrito, número de Reynolds e rugosidade relativa,  $\varepsilon/D$ . Na construção deste ábaco, o autor combinou as Equações 2.18, 2.21, 2.23 e 2.24. A acurácia deste método é em torno  $\pm 15\%$  (WHITE, 1988).



**Figura 2.3:** Fator de atrito de Fanning para fluidos Newtoniano (MOODY, 1944).  
Citado por PERRY & GRENN (1999).

**Tabela 2.2:** Correlações para o fator de atrito turbulento de fluidos Newtonianos.

<b>Autor</b>	<b>Correlação</b>	<b>Observações</b>	<b>Duto</b>	<b>Citado por</b>	
<b>Blasius</b>	$f = \frac{0,079}{Re^{0,25}}$	(2.19)	Turbulento $4000 < Re < 10^5$	Liso	BIRD <i>et al.</i> (1960), FOX & MCDONALD (1995) e WHITE (1988)
<b>von Karman</b>	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,06 \log(Re \sqrt{f}) - 0,60$	(2.20)	Turbulento	Liso	MCCABE <i>et al.</i> (1993) e WELTY <i>et al.</i> (1984)
<b>von Karman</b>	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,06 \log \frac{R}{\varepsilon} + 3,36$	(2.21)	Turbulento $\left(\frac{R}{\varepsilon}\right) / Re \sqrt{f} < 0,005$	Rugoso	SKELLAND (1967) e WELTY <i>et al.</i> (1984)
<b>Nikuradse</b>	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log(Re \sqrt{f}) - 0,40$	(2.22)	Turbulento	Liso	FOUST <i>et al.</i> (1982), SKELLAND (1967) e WELTY <i>et al.</i> (1984)
<b>Nikuradse</b>	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log \frac{R}{\varepsilon} + 3,48$	(2.23)	Turbulento $\left(\frac{R}{\varepsilon}\right) / Re \sqrt{f} < 0,005$	Rugoso	SKELLAND (1967) e WELTY <i>et al.</i> (1984)
<b>Colebrook</b>	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 \log \frac{R}{\varepsilon} + 3,48 +$ $-4,0 \log \left( 1 + 9,35 \frac{R/\varepsilon}{Re \sqrt{f}} \right)$	(2.24)	Transição $\left(\frac{R}{\varepsilon}\right) / Re \sqrt{f} > 0,005$	Rugoso	FOX & MCDONALD (1995), SKELLAND (1967), WHITE (1988) e WELTY <i>et al.</i> (1984)

### 2.2.1.2 Fator de atrito para fluidos não-Newtonianos

O escoamento de fluidos que obedecem ao modelo de Ostwald-de Waele em regime laminar, ao contrário do turbulento, pode ser considerado elucidado (KEMBLOSKI & KOLODZIEJSKI, 1973). Entretanto, o escoamento deste tipo de fluido em regime turbulento continua sendo motivo de inúmeras pesquisas. A maior parte das correlações propostas na literatura para predição do fator de atrito foram obtidas a partir de análises teóricas do modelo de Ostwalde-de Waele.

Importantes revisões foram feitas por KEMBLOSKI & KOLODZIEJSKI (1973) e COELHO (1981), nas quais são mostradas as três tendências seguidas pelos pesquisadores com intuito de correlacionar o fator de atrito no escoamento turbulento de fluidos não-Newtonianos.

- A primeira destas tendências, talvez a mais antiga, usa as equações desenvolvidas para o escoamento turbulento de fluidos Newtonianos para correlacionar o fator de atrito de fluidos não-Newtonianos. Para realizar tal procedimento, várias definições de viscosidades foram adotadas na determinação do número de Reynolds. No caso de fluidos de Ostwald-de Waele, WELTMANN (1956) usou a viscosidade aparente,  $\mu_a$ , definida pela relação entre a tensão cisalhante na parede do tubo,  $\tau_w$ , e a taxa de deformação na parede do tubo,  $\gamma_w$ , dada por,  $\mu_a = \tau_w / \gamma_w$  (SKELLAND, 1967).

- A segunda tendência procura correlacionar os dados experimentais por equações do tipo Blasius, dada por,

$$f = a Re^{-b}, \quad (2.25)$$

onde a e b são parâmetros, ambos são funções das propriedades do fluido. Destaca-se nesta categoria, a correlação proposta por SHAVER & MERRILL (1959) e a metodologia de DODGE & METZNER (1959).

SHAVER & MERRILL (1959), trabalhando com escoamento turbulento de soluções aquosas diluídas de CMC, carbopol e polisobutileno em ciclohexano, correlacionaram com o modelo de Ostwald-de Waele o fator de atrito através de uma equação do tipo Blasius, dada por,

$$f = \frac{0,079}{n^5 (Re_{SM})_{10,5^n}^{2,63}}, \quad (2.26)$$

onde  $Re_{SM}$  é o número de Reynolds de SHAVER & MERRILL (1959), definido por,

$$Re_{SM} = \frac{Dv\rho}{k \left( \frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n}. \quad (2.27)$$

Cabe acrescentar que o desvio máximo encontrado pelos autores ficou entre +33% e -15% para  $0,53 \leq n < 1$ .

- A última tendência faz o uso da “lei de Prandtl” para correlacionar o fator de atrito. Equações deste tipo têm a seguinte forma,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = A \log(\text{Re} f^B) + C, \quad (2.28)$$

onde A, B e C são parâmetros que dependem das propriedades reológicas do fluido. As principais formulações deste grupo serão apresentadas a seguir.

DODGE & METZNER (1959), através de um estudo teórico e experimental utilizando soluções de CMC, carbopol e argila correlacionaram o fator de atrito ao número de Reynolds generalizado definido por METZNER & REED (1955). Estes autores adotaram as hipóteses válidas para o escoamento de fluidos Newtonianos na descrição do escoamento de fluidos não-Newtonianos (SKELLAND, 1967). A correlação obtida por DODGE & METZNER (1959), no caso especial de fluidos de Ostwald-de Waele, é dada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4,0}{n^{0,75}} \log \left[ \text{Re}_{\text{MR}} f^{\left(1-\frac{n}{2}\right)} \right] - \frac{0,4}{n^{1,2}}, \quad (2.29)$$

onde  $\text{Re}_{\text{MR}}$  é o número de Reynolds de METZNER & REED, (1955), definido por,

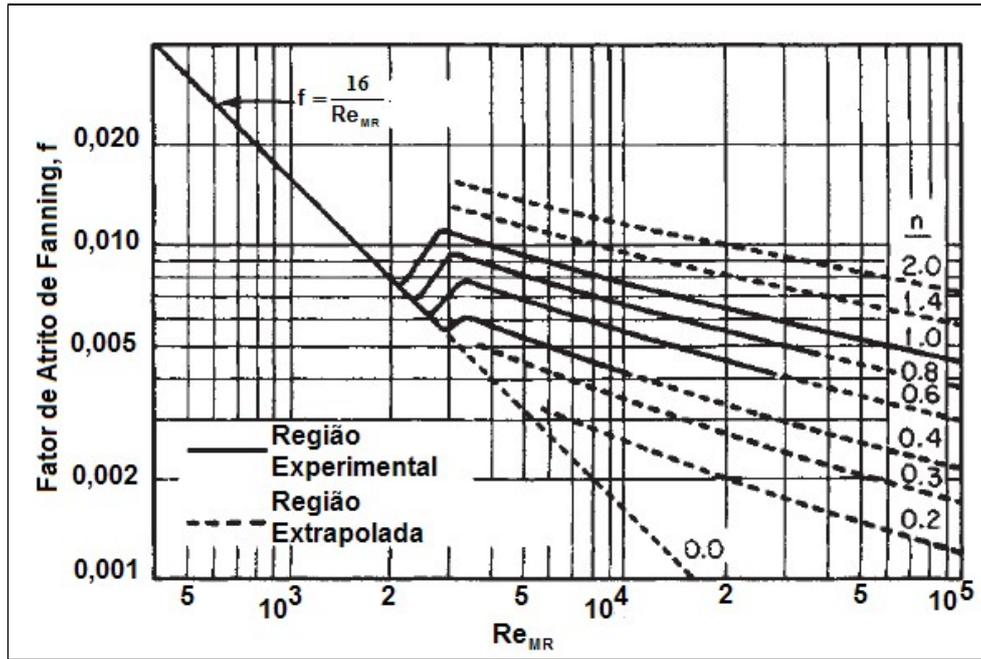
$$\text{Re}_{\text{MR}} = \frac{Dv\rho}{k \left( \frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n}. \quad (2.30)$$

Os dados experimentais obtidos por DODGE & METZNER (1959), fluidos não-Newtonianos, foram correlacionados pela Equação 2.29 com um desvio médio de 1,9% para  $0,4 \leq n \leq 1,0$ . Estes autores apresentaram o fator atrito de Fanning obtido com auxílio da Equação 2.29 em forma de diagrama (Figura 2.4), tanto para a região investigada como para a extrapolada. No desenvolvimento da correlação (Equação 2.29) para predição do fator de atrito, os dados referentes ao escoamento de soluções de CMC não foram levados em conta. Segundo os autores, estas soluções apresentaram comportamento diferente daqueles observados para outras soluções. Neste caso, o fator de atrito para escoamento turbulento parece ser uma extensão do regime laminar e o efeito do diâmetro da tubulação sobre o fator de atrito foi evidente. Tais anomalias foram atribuídas a algum caráter viscoelástico apresentado por estas soluções. DODGE & METZNER (1959) também relacionaram seus dados experimentais a uma equação do tipo Blasius. Neste método, os parâmetros definidos na equação 2.25 são obtidos graficamente. Mais tarde, estes dados foram trabalhados por SCHUH (1964) e resultaram nas seguintes expressões (MACHADO, 2002):

$$a = \frac{(\log n + 3,93)}{50}, \quad (2.31)$$

$$b = \frac{(1,75 - \log n)}{7}. \quad (2.32)$$

No caso de fluidos Newtonianos, as expressões acima se reduzem à equação de Blasius, Equação 2.19, isto é,  $a=0,079$  e  $b=0,25$ .



**Figura 2.4:** Fator de atrito de Fanning para escoamento de fluidos não-Newtonianos (DODGE & METZNER, 1959). Citado por PERRY & GREEN (1999).

CLAPP (1961), trabalhando com fluidos pseudoplásticos, apresentou uma correlação para o fator de atrito onde os parâmetros A, B e C são funções das propriedades reológicas do fluido. Desvios máximos de  $\pm 4\%$  foram observados pelo autor, quando  $0,698 \leq n \leq 0,813$  (SKELLAND, 1967). A equação de CLAPP é dada por,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4,53}{n} \log \left( \text{Re}_{Cl} f^{1-\frac{n}{2}} \right) + \frac{0,45n - 2,75}{n}, \quad (2.33)$$

onde o número de  $\text{Re}_{Cl}$  é definido por,

$$\text{Re}_{Cl} = \frac{D^n v^{2-n} \rho}{k 8^{n-1}}. \quad (2.34)$$

TOMITA (1959) propôs uma correlação para o fator de atrito turbulento baseado no critério de similaridade e no comprimento de mistura de Prandtl, para escoamento laminar e turbulento de fluidos de Bingham e de Ostwald-de Waele (SKELLAND, 1967). Diferentemente de DODGE & METZNER (1959) e CLAPP (1961), a correlação proposta por TOMITA apresenta parâmetros, A, B e C, independentes das propriedades reológicas do fluido e uma outra definição para o fator de atrito. No caso de fluidos de Ostwald-de Waele, a correlação proposta por TOMITA (1959) é dada por,

$$\frac{1}{f} = 4,0 \log \left( \text{Re}_T \sqrt{f_T} \right) - 0,40, \quad (2.35)$$

onde  $f_T$  é o fator de atrito e  $\text{Re}_T$  é o número de Reynolds, ambos definidos no regime laminar e aplicados ao escoamento turbulento por TOMITA (1959),

$$f_T = \frac{2D\Delta P}{3L\rho v^2} \left( \frac{2n+1}{3n+1} \right), \quad (2.36)$$

$$Re_T = \frac{D^n v^{2-n} \rho}{k} \frac{6}{2^n} \left( \frac{n}{2n+1} \right) \left( \frac{3n+1}{n} \right)^{1-n}. \quad (2.37)$$

Para fluidos Newtonianos as correlações proposta por DODGE & METZNER (1959) e TOMITA (1959) adquirem a forma bem conhecida da equação de Karman-Nikuradse, Equação 2.22,

$$\frac{1}{f} = 4,0 \log(Re \sqrt{f}) - 0,40.$$

ERNST (1966) investigou o escoamento turbulento de soluções diluídas de CMC em dois tubos de diferentes diâmetros. No intuito de separar os efeitos viscosos dos elásticos, trabalhou com soluções com índices de comportamento,  $n$ , entre 0,93 e 0,95. Segundo o autor, nenhuma das correlações existentes estimou as curvas de fator de atrito obtidas experimentalmente, o fator de atrito diminuiu com decréscimo do diâmetro do tubo e a falta de concordância entre o perfil de velocidade obtido e os preditos por DODGE & METZNER (1959), CLAPP (1961), e GRANVILLE (1962) indicam a presença de elasticidade ou alguma propriedade adicional além da viscosidade não linear.

MAEGAVA *et al.* (1984) estudaram o escoamento de soluções aquosas de hidroxietilcelulose em tubos de ferro galvanizado de 1,59 cm e 2,64cm de diâmetro interno. Os dados experimentais para o fator de atrito obtidos na região de escoamento turbulento foram comparados com os preditos pelas correlações de DODGE & METZNER (1959), CLAPP (1961) e TOMITA (1959) e, também foi obtida uma correlação do tipo Blasius (Equação 2.38) definida a partir de um número de Reynolds aparente, Equação 2.39. As correlações de CLAPP (1961) e de TOMITA (1959) foram as que apresentaram resultados mais próximos dos experimentais, dentre as três correlações testadas. A correlação proposta pelos autores é dada por,

$$f = \frac{0,0485}{Re_{ap}^{0,203}}, \quad (2.38)$$

$$Re_{ap} = \frac{Dv\rho}{\mu_{ap}}, \quad (2.39)$$

sendo  $\mu_{ap}$  a viscosidade aparente definida pelo quociente entre a tensão cisalhante e taxa de cisalhamento. A Equação 2.38 foi obtida a partir de 130 pontos experimentais com  $3000 < Re_{ap} < 23536$  e  $0,607 \leq n \leq 0,879$ .

HARTNETT & KOSTIC (1990) avaliaram o desempenho de algumas correlações na estimação do fator de atrito de fluidos puramente viscosos em regime turbulento, em duto circular e não-circular. Dentre as correlações testadas, no caso de duto circular, estão a de DODGE & METZNER (1959), IRVINE (1988), YOO (1974) e TAM & TIU (1988). A correlação de DODGE & METZNER (1959) é dada pela Equação 2.29, enquanto as outras três são dadas respectivamente por,

$$f = \frac{2 \left( \frac{2^n}{7^{7n}} \right)^{\frac{1}{3n+1}} 8^{\frac{(1-n)}{3n+1}}}{\left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{\frac{(3n^2+2n)}{(3n+1)}}} \text{Re}^* \left( \frac{-1}{3n+1} \right), \quad (2.40)$$

$$f = 0,079n^{0,675} (\text{Re}^*)^{-0,25}, \quad (2.41)$$

$$f = 0,0792 \left[ \frac{(c+d)n}{c+dn} \right]^{2,50} (\text{Re}^*)^{-0,25}, \quad (2.42)$$

onde  $\text{Re}^*$  é o número de Reynolds de KOZICKI *et al.* (1966), definido por,

$$\text{Re}^* = \frac{\rho v^{2-n} D_h^n}{k \left( \frac{c+dn}{n} \right)^n 8^{n-1}}, \quad (2.43)$$

sendo  $c$  e  $d$  são parâmetros geométricos que valem, no caso de tubo circular, 0,25 e 0,75, respectivamente.  $D_h$  é o diâmetro hidráulico. Para a faixa de índice de comportamento estudada,  $0,24 < n < 0,53$ , de modo geral, a correlação de DODGE & METZNER (1959) foi a que forneceu fatores de atrito mais próximo dos experimentais.

Nas últimas décadas, vários pesquisadores têm se atentado ao fenômeno da redução de arraste, isto é, redução do fator de atrito a valores inferiores aos de fluidos Newtonianos, sob o mesmo número de Reynolds. A máxima redução para fator de atrito, provocada pela adição de pequenas quantidades de polímeros, pode ser dada pela assíntota proposta por VIRK (1975). De certa forma, os efeitos de redução têm sido atribuídos às propriedades viscoelásticas dos fluidos.

PINHO & WHITELAW (1990) trabalharam com escoamento turbulento de soluções poliméricas de CMC em dutos, ajustadas pelo modelo de Ostwald-de Waelle. Segundo estes autores o atraso na transição do regime laminar para turbulento foi causado pela pseudoplasticidade do fluido, já que o fluido era de baixa viscoelasticidade. Todavia o efeito de redução de arraste foi identificado e a assíntota proposta por VIRK (1975), a qual prevê a máxima redução, mostrou-se apropriada para este tipo de fluido.

WÓJS (1993) realizou uma vasta quantidade de experimentos com soluções poliméricas diluídas de alto peso molecular, escoando em dutos lisos e rugosos, regime laminar e turbulento. Neste trabalho foram avaliadas as influências do diâmetro e rugosidade da tubulação, do peso molecular e da concentração. Para o escoamento turbulento, o efeito da concentração foi evidente, as curvas para fator de atrito situaram entre a curva dos Newtonianos e a assíntota de VIRK (1975). O aumento de concentração provocou um deslocamento da curva de resistência no sentido da assíntota. Soluções de polímeros com alto peso molecular apresentaram curvas próximas da curva dada pela correlação de VIRK (1975). A influência do diâmetro do duto também foi visível, sendo que os dutos com menores diâmetros apresentaram fatores de atrito mais baixos. O efeito de redução de arraste também foi percebido em dutos rugosos.

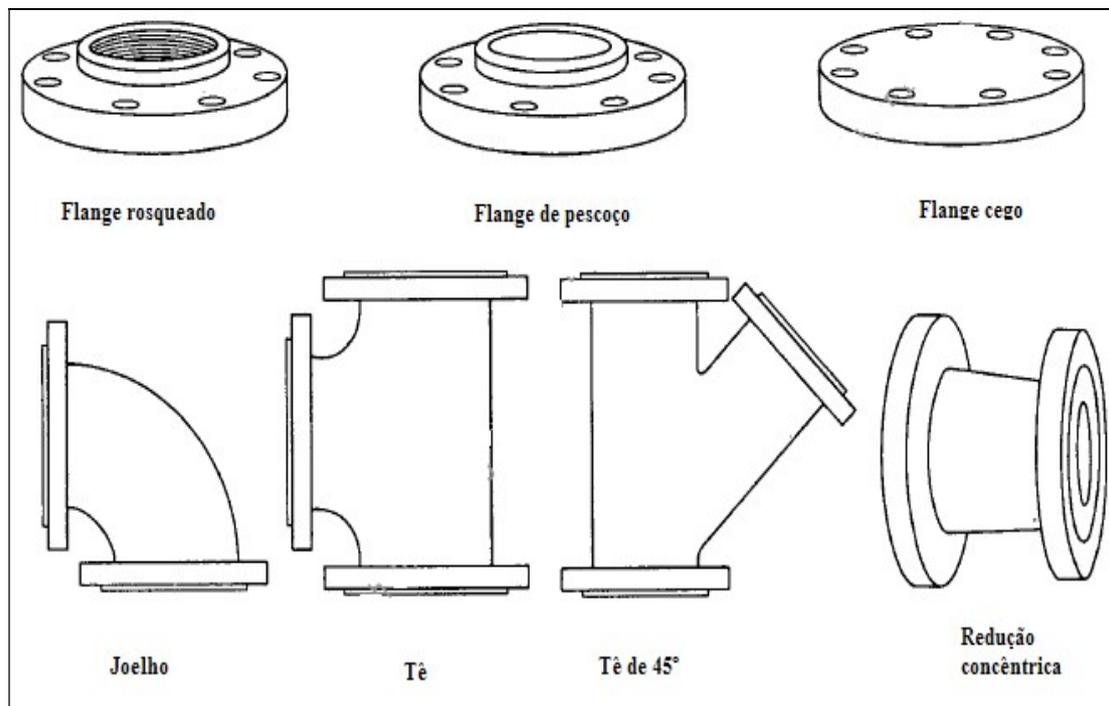
PEREIRA & PINHO (1994) trabalharam com soluções poliméricas de baixo peso molecular, no caso tylose com peso molecular igual a 6000 kg/kmol. Os resultados hidrodinâmicos mostraram efeitos elásticos através da redução de arraste. Os fatores de atrito obtidos pelos autores foram menores que os preditos pela correlação de DODGE & METZNER (1959) válida para fluidos puramente viscosos e pseudoplásticos.

### 2.2.2 Perda de carga localizada, $h_s$

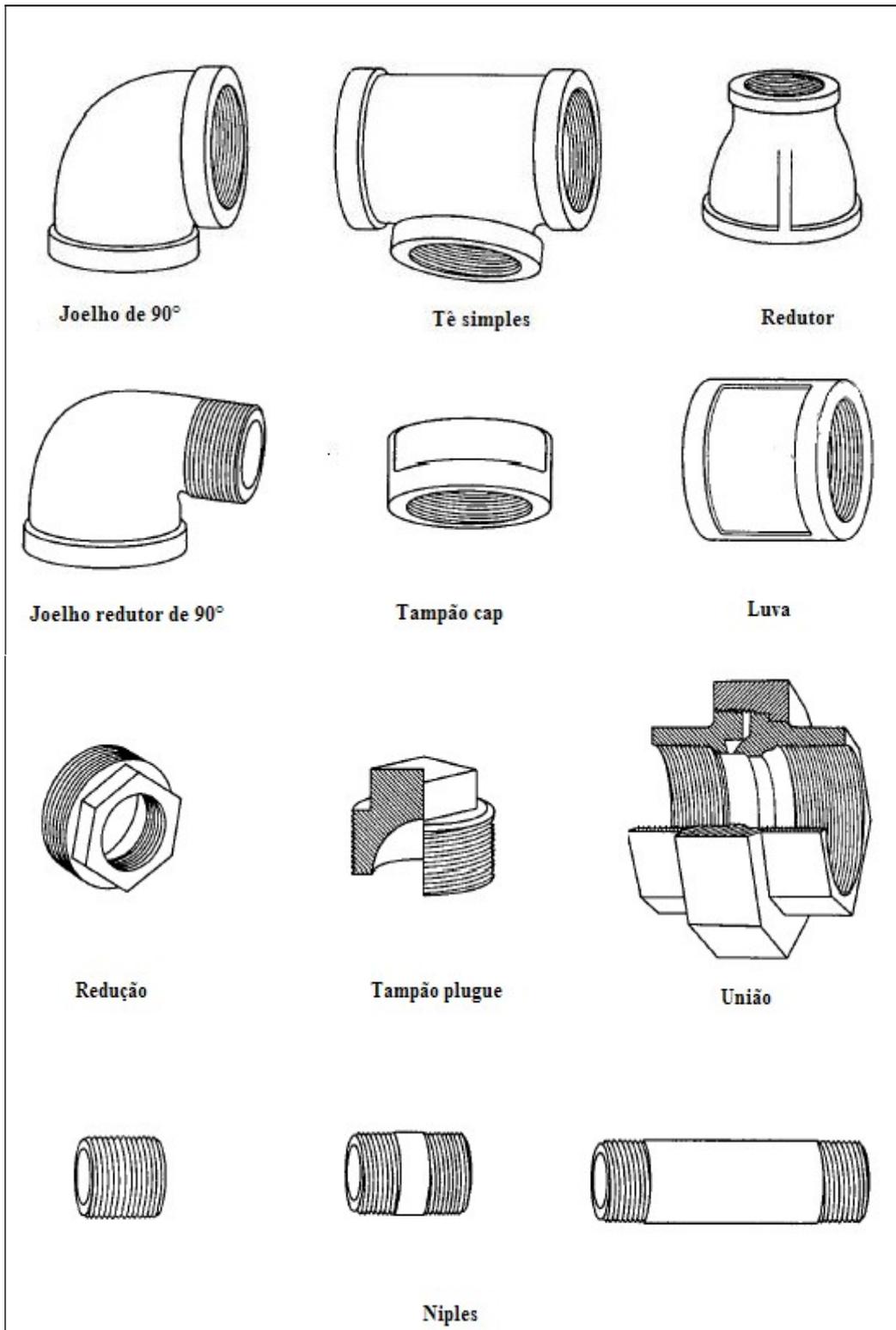
A perda de carga em acidentes é resultado do atrito da parede, da alteração na direção do escoamento, obstruções na trajetória do fluido e mudanças abruptas ou graduais na área de escoamento. Na maioria dos acidentes a contribuição devida ao atrito é menor que as outras três (CRANE COMPANY, 1976).

Dentre os diversos tipos de acidentes podemos citar: reduções, expansões, joelhos, tês, luvas, uniões, niples e outros. As reduções e expansões apresentam mudança na área de escoamento enquanto joelhos, tês e curvas alteram a direção do escoamento. Devido a sua geometria simples, as uniões, niples e luvas oferecem pouca resistência ao escoamento. Já a perda de carga ocasionada em válvulas é resultado do tipo de configuração geométrica. As válvulas do tipo esfera, gaveta e borboleta ocasionam menores perdas, pois não provocam grandes alterações na direção do escoamento como acontece quando o fluido escoar por uma válvula globo ou angular.

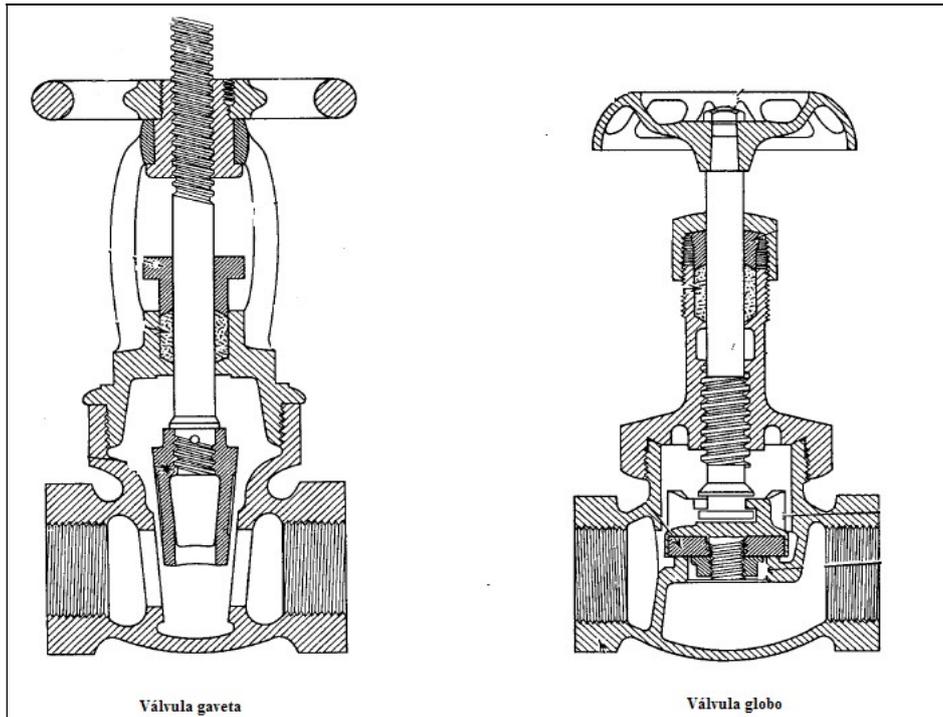
Nas Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 estão apresentados vários tipos de acidentes comuns em tubulações.



**Figura 2.5:** Alguns tipos de acidentes flangeados comuns no sistema de tubulação (FOUST, 1982).

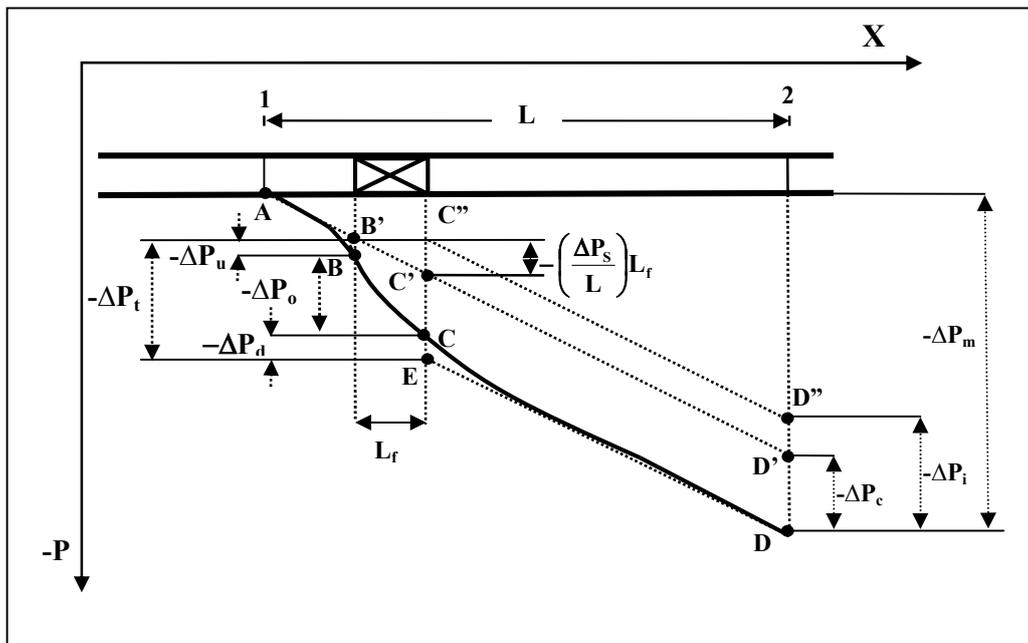


**Figura 2.6:** Acidentes de tubulações rosqueados típicos (FOUST, 1982).



**Figura 2.7:** Válvulas típicas (FOUST, 1982).

A presença de algum acidente se manifesta como um excesso de queda de pressão àquela perda referente ao segmento reto de mesmo comprimento. Esse “distúrbio” se projeta tanto no escoamento antes, como no depois de cada acidente. A Figura 2.8 mostra de forma geral o perfil de pressão ao longo de uma tubulação contendo um acidente qualquer.



**Figura 2.8:** Perfil de pressão ao longo de segmento reto contendo um acidente (baseada no trabalho de TURIAN *et al.* (1998)).

Nesta figura, a curva ABCD representa o perfil axial de pressão entre os pontos 1 e 2 contendo um tipo qualquer de acidente (sem mudança de diâmetro ou direção do escoamento). Se este for substituído por um segmento reto de mesmo comprimento, o perfil de pressão, neste caso, pode ser dado pela curva AB'C'D'. Quando se retira o acidente, de comprimento  $L_f$ , o perfil de pressão será representado pela curva AB'C'D". Nesta última situação, o comprimento do trecho 1 e 2 não é mais igual a  $L$ , e sim igual a  $L-L_f$ .

A queda de pressão total,  $\Delta P_t$ , devido à presença do acidente consiste de três contribuições:

1. Queda de pressão acidente projetada na jusante, dada pelo segmento BB' ou  $\Delta P_u$ ;
2. Queda de pressão do acidente manifestada dentro da própria extensão que compõe o acidente,  $L_f$ , dada pelo segmento BC ou  $\Delta P_o$ ;
3. Queda de pressão do acidente projetada na montante, dada pelo segmento CE ou  $\Delta P_d$ .

Portanto, a queda de pressão total provocada por um acidente, de comprimento  $L_f$ , incluído a queda devido ao segmento reto de mesmo comprimento, pode ser dada por,

$$(-\Delta P_t) = (-\Delta P_u) + (-\Delta P_o) + (-\Delta P_d), \quad (2.44)$$

ou

$$(-\Delta P_i) = (-\Delta P_t) = (-\Delta P_m) - \left( \frac{-\Delta P}{L} \right) (L - L_f), \quad (2.45)$$

onde  $(-\Delta P_m)$  é a queda de pressão total entre os pontos 1 e 2,  $(-\Delta P/L)(L-L_f)$  é a queda de pressão ocasionada na seção reta de comprimento  $(L-L_f)$  e  $(-\Delta P_i)$  é igual  $(-\Delta P_t)$ .

A queda de pressão "correta",  $(-\Delta P_c)$ , pode ser dada excluindo a queda referente ao trecho reto com comprimento igual ao acidente, representado por  $L_f$ . Neste caso, a queda de pressão é dada por,

$$(-\Delta P_c) = (-\Delta P_m) - L \left( \frac{-\Delta P}{L} \right). \quad (2.46)$$

Para acidentes que provocam mudanças na área de escoamento (diâmetro) ou possuem diferenças de cotas deve-se levar em conta as conversões de energias ocasionadas durante o escoamento. Tomando como referência o ponto 1 na Figura 2.8, pode-se representar nesta o perfil de perda de carga,  $h_t$ , em função de  $x$  (posição ao longo do duto) através da seguinte equação:

$$h_t(x) = -\frac{1}{\rho g} (P(x) - P_1) - \frac{1}{2g} (v^2(x) - v_1^2) - (z(x) - z_1). \quad (2.47)$$

Conseqüentemente, a perda de carga ocasionada em qualquer tipo de acidente pode ser dada por,

$$h_s = h_t = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + z_2 - z_1. \quad (2.48)$$

As perdas de carga ocasionadas em acidentes podem ser expressas em função do coeficiente de perda de carga, K, dado por,

$$K = \frac{h_s}{v^2/2g}, \quad (2.49)$$

onde K é definido como sendo o número de cargas cinéticas perdidas,  $h_s$  é a perda de carga devido ao acidente,  $v$  é a velocidade média do fluido e  $g$  é a aceleração da gravidade. Alternativamente, a perda de carga também pode ser expressa como,

$$h_s = 4f \frac{L_c}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (2.50)$$

onde  $f$  é o fator de atrito de Fanning,  $L_c/D$  é o comprimento equivalente do acidente em diâmetros de tubo reto que causa a mesma perda de carga quando submetido as mesmas condições de escoamento. Da igualdade das Equações 2.49 e 2.50 tem-se,

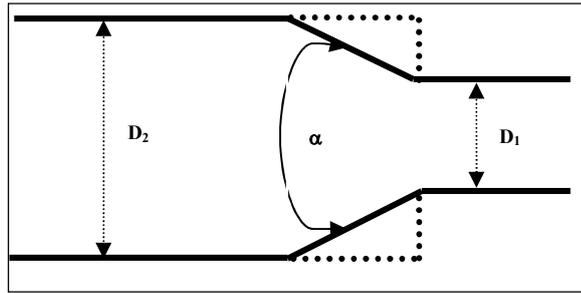
$$K = 4f \frac{L_c}{D}. \quad (2.51)$$

### 2.2.2.1 Coeficiente de perda para fluidos Newtonianos

Pode-se encontrar na literatura, com certa facilidade, uma ampla quantidade de dados de coeficientes de perda carga para fluidos Newtonianos, apresentados em forma de tabelas ou por correlações empíricas.

Em relação ao escoamento turbulento de fluidos Newtonianos, uma grande quantidade de dados para coeficiente de perda de carga foi apresentada por CRANE COMPANY (1976).

As obstruções, isto é, acidentes em que há alteração na área de escoamento como os diversos tipos de contrações e expansões, o coeficiente de perda pode ser correlacionado tanto com a velocidade média referente ao menor diâmetro como a velocidade média no maior diâmetro. A Figura 2.9 representa uma contração concêntrica. Nesta figura,  $D_1$  e  $D_2$  são o menor e maior diâmetro, respectivamente.  $\alpha$  é o ângulo de convergência e expressa a geometria da redução, isto é, se é gradual ou de forma súbita.



**Figura 2.9:** Representação de uma redução concêntrica.

Segundo CRANE COMPANY (1976), o coeficiente de perda deste tipo de acidente, para o escoamento de água em regime turbulento, pode ser dado por,

$$K_1 = 0,8(1 - \beta^2) \text{sen} \frac{\alpha}{2} \quad \text{válida para } \alpha \leq 45^\circ, \quad (2.52)$$

ou

$$K_1 = 0,5(1 - \beta^2) \sqrt{\text{sen} \frac{\alpha}{2}} \quad \text{válida para } 45^\circ < \alpha \leq 180^\circ, \quad (2.53)$$

onde  $K_1$  é o coeficiente de perda de carga relacionado com a velocidade média no menor diâmetro,  $D_1$ , e  $\beta$  é a razão  $D_1/D_2$ . A perda de carga também pode ser expressa em função da velocidade média no maior diâmetro,  $D_2$ , empregando  $K_2$ .  $K_1$  e  $K_2$  se correlacionam da seguinte maneira,

$$K_1 = \beta^4 K_2. \quad (2.54)$$

No caso de uma contração abrupta,  $\alpha$  é igual a  $180^\circ$ , o coeficiente de perda é dado por,

$$K_1 = 0,5(1 - \beta^2). \quad (2.55)$$

Em regime laminar, os trabalhos de coeficientes de perda carga são escassos (STEFFE, 1996). Uma boa referência para essa condição de escoamento são os dados obtidos a partir das curvas de KITTREDGE & ROWLEY (1957) e apresentados em forma de tabela por PERRY & GREEN (1999). Os dados destes autores indicam que o coeficiente de perda de carga é constante para valores de Reynolds entre 500 e 2000. Abaixo desta faixa o valor de  $K$  cresce rapidamente quando número de Reynolds diminui.

Na tentativa de correlacionar o coeficiente para uma ampla faixa de número de Reynolds, englobando tanto o escoamento laminar como o turbulento, HOOPER (1981) propôs o “método 2-K” para o cálculo do coeficiente de perda para diversos tipos de acidentes. Este método, como o próprio nome sugere, consiste na utilização de duas constantes definidas em função de valores extremos de número de Reynolds,

$$K = \frac{K^*}{\text{Re}} + K_\infty \left( 1 + \frac{1}{D} \right), \quad (2.56)$$

Nesta equação, D é o diâmetro interno em polegadas. Cabe observar que o método 2-K, assim como os outros, não leva em conta a dependência da rugosidade, entretanto considera a influência do diâmetro.

Para o escoamento em regime turbulento de fluidos Newtonianos o coeficiente de perda pode ser considerado constante, isto é, independe do número de Reynolds, para um determinado tamanho de acidente (HOOPER, 1981 e CRANE COMPANY, 1976).

### 2.2.2.2 Coeficiente de perda para fluidos não-Newtonianos

Apesar da importância do coeficiente de perda de carga durante a execução de projetos envolvendo o escoamento de fluidos não-Newtonianos, existem poucos trabalhos na literatura que retratam a perda de carga em acidentes.

TURIAN *et al.* (1998) estudaram a perda de carga ocasionada em 24 tipos diferentes de acidentes, incluindo 2 diâmetros diferentes. Dentre os itens estudados estão válvulas, curvas, expansões, contrações e medidor Venturi. Na realização deste estudo, os autores utilizaram lamas não-Newtonianas de laterita e gipsita em diversas concentrações, em regime laminar e turbulento. Para o escoamento laminar, o coeficiente de perda foi inversamente proporcional ao número de Reynolds generalizado. Já no escoamento turbulento os coeficientes de perda aproximaram assintoticamente aos do escoamento de água, em altos números de Reynolds.

POLIZELLI *et al.* (2003) realizaram um estudo do escoamento de fluidos não-Newtonianos do tipo pseudoplástico, regime laminar e turbulento. Neste trabalho estudou-se a perda de carga ocasionada em válvulas borboleta e de macho (*plug*), totalmente e parcialmente abertas, curvas e união. Os coeficientes de perda experimental foram correlacionados com o número de Reynolds generalizado (Equação 2.30) através do método 2-K proposto por HOOPER (1981), dado pela Equação 2.56,

$$K = \frac{K^*}{Re} + K_{\infty} \left( 1 + \frac{1}{D} \right).$$

ETMAD (2004) estudou a perda de carga ocasionada em joelho 90°, válvulas gaveta e globo, contração e expansão súbitas. Para realização deste trabalho, o autor utilizou soluções aquosas de CMC em diferentes concentrações, escoando em regime turbulento. Os coeficientes de perda médio, para cada acidente, foram correlacionados ao índice de comportamento, n, do modelo de Ostwalde-de Waele, por,

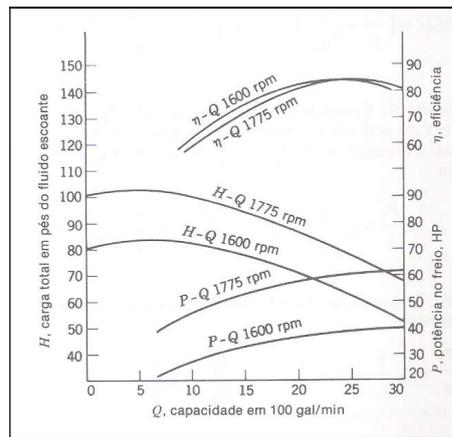
$$K = En^2 + Fn + G, \quad (2.57)$$

onde E, F e G são parâmetros característicos de cada tipo de acidente. A faixa de índice de comportamento investigada foi  $0,616 \leq n \leq 0,927$ .

## 2.3 Bomba Centrífuga

As bombas centrífugas são as mais usadas nas indústrias químicas para o transporte de líquidos de todos os tipos. A aplicabilidade deste tipo de bomba é em virtude da simplicidade do modelo, do pequeno custo inicial, do fluxo uniforme, da manutenção barata, da flexibilidade de aplicação, da operação silenciosa e pequeno espaço para instalação.

O princípio básico de funcionamento deste tipo de bomba consiste na conversão de energia cinética em carga de pressão estática que provoca o fluxo (COULSON & RICHARDSON, 1979). As bombas centrífugas podem operar numa larga faixa de vazão e altura manométrica. De um modo geral, as características operacionais das bombas são descritas através das curvas características. Estas mostram as relações entre a carga fornecida pela bomba ao fluido (H), número de rotações (rpm), potência (P) e eficiência ( $\eta$ ) desta à vazão (Q). A Figura 2.10 representa esquematicamente a curva característica típica de uma bomba centrífuga.



**Figura 2.10:** Curva característica típica.

Descrições detalhadas deste tipo de bomba quanto às possibilidades de funcionamento, aplicações e o fenômeno da cavitação podem ser encontradas em FOUST *et al.* (1982) e MACINTYRE (1980).

A altura manométrica ou carga fornecida pela bomba ao fluido é influenciada pela densidade e viscosidade do fluido. Um aumento de viscosidade provoca uma diminuição na altura manométrica, o mesmo acontece com a densidade (MACINTYRE, 1980). No entanto, cabe acrescentar que viscosidades inferiores a 50 centipoises não afetam substancialmente a carga fornecida pela bomba ao fluido (PERRY & CHILTON, 1980).

Algumas observações para bombeamento de fluidos não-Newtonianos têm sido relatadas na literatura. Segundo COULSON & RICHARDSON (1982), podem ocorrer problemas no arranque (partida) quando se trata de bombeamento de fluidos do tipo pseudoplásticos. Neste momento, quando parte do repouso, o fluido apresenta altas viscosidades efetivas que podem causar sobrecarga no motor da bomba. Soma-se a isto, o fato que, neste instante, a viscosidade do líquido no tubo de descarga tem seu valor máximo. Além disso, muitos materiais pseudoplásticos são danificados e degradados pelo bombeamento prolongado.

PINHO (1987) observou um decréscimo de 10% na viscosidade da solução de CMC com 0,4% em peso após 6 horas de recirculação com bomba centrífuga a altas taxas de escoamento. Dados mais recentes mostraram o mesmo resultado para soluções de CMC com 0,1% e 0,2% em peso (PINHO & WHITELAW, 1990).

PEREIRA & PINHO (1994), utilizando uma bomba centrífuga para realizar o deslocamento do fluido pela unidade experimental, observaram um decréscimo máximo de 10% na viscosidade de soluções de tylose (0,4% em peso) quando submetido a um período de 20 horas de recirculação.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme mencionado anteriormente, busca-se, neste trabalho, testar o desempenho de algumas correlações disponíveis na literatura na predição do fator de atrito para fluidos não-Newtonianos, avaliar a influência das propriedades reológicas do fluido no coeficiente de perda e na carga fornecida pela bomba centrífuga.

O trabalho experimental consistiu basicamente de duas etapas. Na primeira etapa realizou-se a montagem da unidade de obtenção de perda de carga e adequação desta ao escoamento de fluidos newtonianos. A segunda visou à obtenção de dados de perda de carga para fluidos não-Newtonianos, em tubo reto, redução, joelho e válvula globo.

#### 3.1 Fluidos Utilizados

Durante a realização deste trabalho, empregou-se três tipos de fluido: água e soluções poliméricas de CMC e goma xantana. A água foi utilizada como fluido padrão durante a etapa de adequação e calibração da unidade experimental construída. Enquanto as soluções de CMC e goma xantana foram empregadas como fluidos não-Newtonianos.

Foram utilizadas soluções aquosas de carboximetilcelulose (CMC) e goma xantana nas seguintes concentrações, Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Soluções poliméricas estudadas.

CMC %(p/v)	Goma Xantana %(p/v)
0,100	0,010
0,150	0,012
0,200	0,020
0,250	0,025
0,400	0,040
0,500	0,100
0,900	-
1,000	-
1,350	-

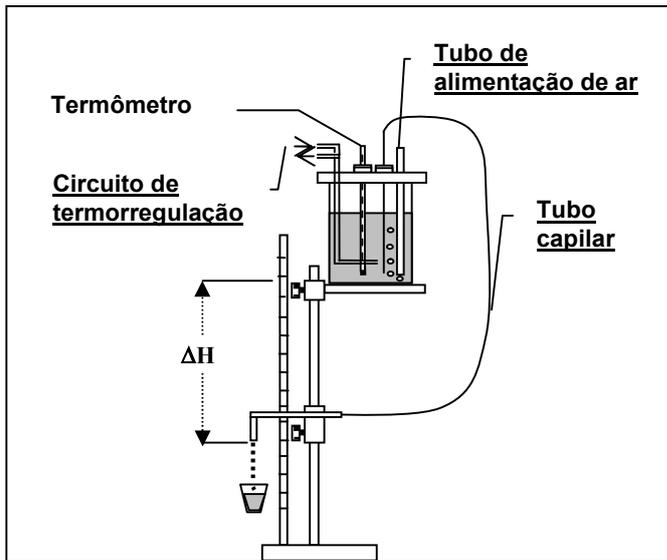
<sup>a</sup> %(p/v): Percentagem peso/volume.

#### 3.1.1 Reologia

Os fluidos usados na obtenção da perda de carga foram analisados em um viscosímetro capilar proposto por MASSARANI (1981). Este viscosímetro, de fácil construção, consiste em um recipiente de vidro com volume aproximado de 2 litros. Como se pode observar na Figura 3.1, a tampa sustenta uma serpentina conectada a um banho termostático (LAUDA, modelo RM 6B) com circulação externa necessário no controle da temperatura, um termômetro, um tubo de alimentação de ar e um orifício por onde passa o tubo capilar.

Neste estudo foram utilizados dois capilares com comprimentos iguais a 200 e 300 cm, ambos com 0,194 cm de diâmetro interno (determinado com auxílio de água, fluido com

densidade e viscosidade conhecidas). A homogeneização da solução, dentro do viscosímetro, foi feita com o auxílio de um agitador magnético.



**Figura 3.1:** Viscosímetro capilar.

Com o equipamento descrito acima obteve-se os dados de vazão mássica no tubo capilar para diferentes desníveis do sistema, ou seja, para diferentes alturas,  $H$ . Estes dados foram correlacionados por meio da taxa de distensão característica,  $\gamma^*$ , uma propriedade cinemática do escoamento e a tensão cisalhante característica,  $\tau^*$ , uma propriedade material do fluido, definidas por MASSARANI (1999), respectivamente por,

$$\tau^* = \frac{D}{5} \left( \frac{\Delta P}{L} \right), \quad (3.1)$$

$$\gamma^* = 6,4 \frac{v}{D}, \quad (3.2)$$

onde  $D$ ,  $\Delta P$ ,  $L$  e  $v$  são o diâmetro do capilar, a queda de pressão piezométrica, o comprimento do capilar e a velocidade média do fluido no escoamento dentro do capilar, respectivamente. Neste caso, a queda de pressão piezométrica é,

$$\Delta P = \rho g \Delta H, \quad (3.3)$$

onde  $\Delta H$  é a diferença de cota entre a extremidade inferior do tubo de alimentação de ar e a extremidade inferior do capilar, como indicado na Figura 3.1,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\rho$  é a densidade do fluido.

Da análise da relação entre a taxa de deformação característica,  $\gamma^*$ , e tensão cisalhante característica,  $\tau^*$ , pode-se determinar os parâmetros reológicos do modelo de Ostwald-de Waele dado pela Equação 2.3,

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados reológicos das soluções poliméricas utilizadas neste trabalho. Os ensaios reológicos foram realizados na

temperatura média de cada corrida. Portanto, às vezes, para determinadas concentrações foram feitos mais de um ensaio reológico.

**Tabela 3.2:** Dados de concentração, temperatura, índice de comportamento, índice de consistência, taxa de cisalhamento, densidade do fluido e coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

Soluções	% (p/v)	T (°C)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	n	k (dina s <sup>n</sup> /cm <sup>2</sup> )	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
GX	0,010	22,8	1,01	0,960	0,0160	95-2030	0,99
		26,0	1,01	0,965	0,0144	100-2044	0,99
		28,0	1,01	0,979	0,0121	110-2028	0,99
	0,012	24,1	1,01	0,905	0,0220	83-1730	0,99
		26,0	1,01	0,907	0,0219	85-1739	0,99
		28,5	1,01	0,906	0,0215	88-2052	0,99
	0,020	26,9	1,01	0,786	0,0590	45-2012	0,99
		28,5	1,01	0,799	0,0520	52-1720	0,99
	0,040	25,4	1,01	0,579	0,3185	27-1063	0,99
	0,100	24,5	1,01	0,399	1,8490	2-496	0,99
		26,5	1,01	0,397	1,8680	2-485	0,99
	CMC	0,100	28,0	1,00	0,921	0,0227	81-1527
30,0			1,00	0,933	0,0206	85-1570	0,99
0,150		31,0	1,00	0,895	0,0314	64-1544	0,99
0,200		24,7	1,00	0,843	0,0560	40-1196	0,99
		26,0	1,00	0,858	0,0521	43-1198	0,99
0,250		27,5	1,00	0,840	0,0645	36-1100	0,99
0,400		27,0	1,00	0,830	0,0880	24-815	0,99
		29,0	1,00	0,832	0,0869	25-818	0,99
0,500		29,5	1,00	0,817	0,1109	20-682	0,99
0,900		28,7	1,00	0,824	0,2040	5-249	0,99
		30,0	1,00	0,830	0,1965	6-251	0,99
1,000		32,7	1,01	0,825	0,2404	5-209	0,99
1,350	30,0	1,01	0,813	0,3193	3-157	0,99	
	32,9	1,01	0,816	0,3160	3-158	0,99	

### 3.2 Unidade Experimental

A unidade experimental, Figura 3.2, consiste de um sistema horizontal operando em circuito fechado de 6 metros de extensão com tubos comerciais de PVC (liso) conectados a um tanque de forma cilíndrica com capacidade de 500 litros. O deslocamento do fluido ao longo do sistema foi realizado por uma bomba centrífuga de 1,5HP, modelo CAM W-6C fabricada pela Dancor.

Ao longo desse sistema existem seções de teste para obtenção da perda de carga tanto em duto reto como em acidentes. O segmento reto, obtenção do fator de atrito, tem 387 cm de comprimento e diâmetro interno igual a 2,648 cm. Os acidentes utilizados na obtenção do coeficiente de perda foram: redução 1" para 3/4" de diâmetro nominal, joelho de 90° e válvula globo, ambos com 1" de diâmetro nominal. Enquanto um

manômetro e um manovacuômetro, posicionados no recalque e na sucção da bomba, respectivamente, permitiram obter a carga fornecida ao fluido.

Todas as “tomadas de pressão” estão localizadas de maneira a minimizar os efeitos de entrada e saída, ou seja, escoamento plenamente desenvolvido. A medida de perda de carga foi feita com o auxílio de manômetros de tubo em U contendo tetracloreto de carbono ou mercúrio como fluidos manométricos.

A vazão foi determinada através da coleta de amostra em um determinado intervalo de tempo. Este procedimento era repetido três vezes para obter a vazão mássica média.

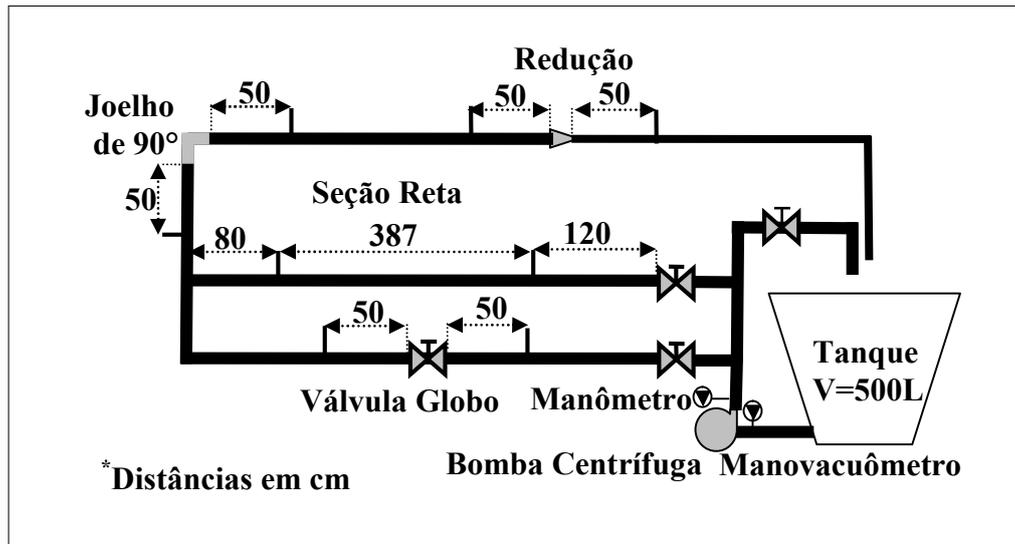


Figura 3.2: Unidade Experimental.

### 3.3 Procedimento Experimental

O experimento iniciava-se com a preparação das soluções poliméricas. Adicionava-se, aos poucos, a quantidade de polímero necessária para produzir um determinado volume de solução, geralmente 300 litros, em um recipiente menor. Depois de totalmente dissolvida, a solução era vertida ao tanque maior onde era completado com água até atingir o volume requerido e deixava-se circulando por período de aproximadamente de 30 minutos para garantir uma boa homogeneização da solução.

Com auxílio de válvulas posicionadas no recalque da bomba controlava-se a trajetória a ser percorrida e a vazão do fluido. O fluido, em geral, percorria três caminhos diferentes para cada concentração. Uma para obter a carga fornecida pela bomba ao fluido, outra para obter a perda de carga em tubo reto, joelho 90° e redução e a última para obter a perda de carga ocorrida na válvula globo. Para cada trajetória estabelecida, variava-se a vazão de modo a obter diferentes quedas de pressão ou carga fornecida, de acordo com cada item estudado. A cada nova vazão aguardava-se alguns instantes para que o escoamento atingisse o regime permanente. Quando isto ocorria, determinava-se a vazão mássica e as perdas de carga ou carga fornecida correspondente. A temperatura era determinada a cada vazão e ao final determinava-se a temperatura média de cada corrida.

Depois de terminado o experimento de perda de carga ou carga fornecida pela bomba, recolhia-se uma amostra para a determinação da reologia do fluido utilizado.

### 3.4. Perdas de Pressão em Seções Retas e Obstruções

As perdas de pressão ocasionadas na seção reta, redução, joelho e válvula globo foram determinadas com auxílio de manômetros em U. A diferença de altura de fluido manométrico permitiu tal procedimento. No caso da seção reta, redução, e válvula globo, as perdas de pressão,  $\Delta P$ , puderam ser calculadas por,

$$\Delta P = g\Delta h(\rho_F - \rho_M), \quad (3.4)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\Delta h$  é a diferença de altura de fluido manométrico,  $\rho_F$  é a densidade do fluido e  $\rho_M$  é densidade do fluido manométrico. A Equação 3.4 é válida só para escoamento horizontal, entretanto para escoamento vertical deve-se levar em conta a diferença de cota entre as tomadas de pressão. Como pode ser observado na Figura 3.2, as tomadas de pressão para obtenção da perda de carga no joelho  $90^\circ$  encontram-se em alturas diferentes. Neste caso, a perda de pressão foi calculada por,

$$\Delta P = \rho_F g(h - \Delta h) + \rho_M g\Delta h, \quad (3.5)$$

onde  $h$  é o desnível entre as tomadas de pressão e  $\Delta h$  é a diferença de altura de fluido manométrico.

Cabe ressaltar que todas as tomadas de pressão, exceto a da seção reta, foram feitas a 50 cm antes e 50 cm depois de cada item estudado, isto é, redução, joelho e válvula globo. Em cada perda de pressão medida estão incluídas as perdas de pressão referente às seções retas existentes antes e depois de cada acessório, portanto foram descontadas da perda de pressão total medida.

### 3.5. Carga Fornecida pela Bomba ao Fluido

A carga fornecida ao fluido pela bomba foi obtida com o auxílio de um manômetro e um manovacuômetro, ambos do tipo Bourdon. A diferença de pressão manométrica medida com estes instrumentos e a diferença de altura,  $H$ , entre os dois, pode ser correlacionado por,

$$H_F = \frac{P_M - P_V}{\rho g} + H, \quad (3.6)$$

onde  $H_F$  é carga fornecida ao fluido pela bomba,  $P_M$  é pressão medida no manômetro,  $P_V$  é pressão medida no manovacuômetro e  $H$  é diferença de cota entre estes dois instrumentos de medida de pressão.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais obtidos de fator de atrito, coeficiente de perda de carga e carga fornecida pela bomba serão apresentados e discutidos em duas partes:

- Abordagem dos resultados obtidos com água durante a calibração da unidade;
- Resultados obtidos para o escoamento de soluções poliméricas.

#### 4.1 Calibração da Unidade Experimental

Esta etapa consistiu na calibração da unidade utilizada nos experimentos com fluidos não-Newtonianos. Foram obtidos dados experimentais de fator atrito, coeficiente de perda de carga para joelho, redução e válvula globo e a carga fornecida pela bomba centrífuga, utilizando água como fluido de calibração. Os dados experimentais para os elementos de tubulação estudados e mencionados acima serão tratados da seguinte maneira:

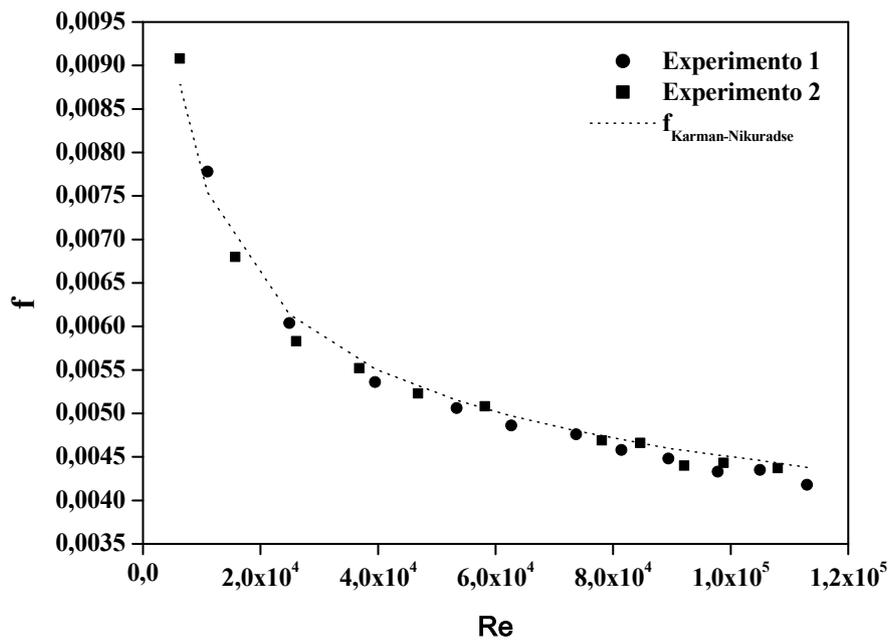
- Fator de atrito;
- Coeficiente de perda de carga: redução, joelho e válvula globo;
- Carga fornecida pela bomba.

##### 4.1.1 Fator de atrito

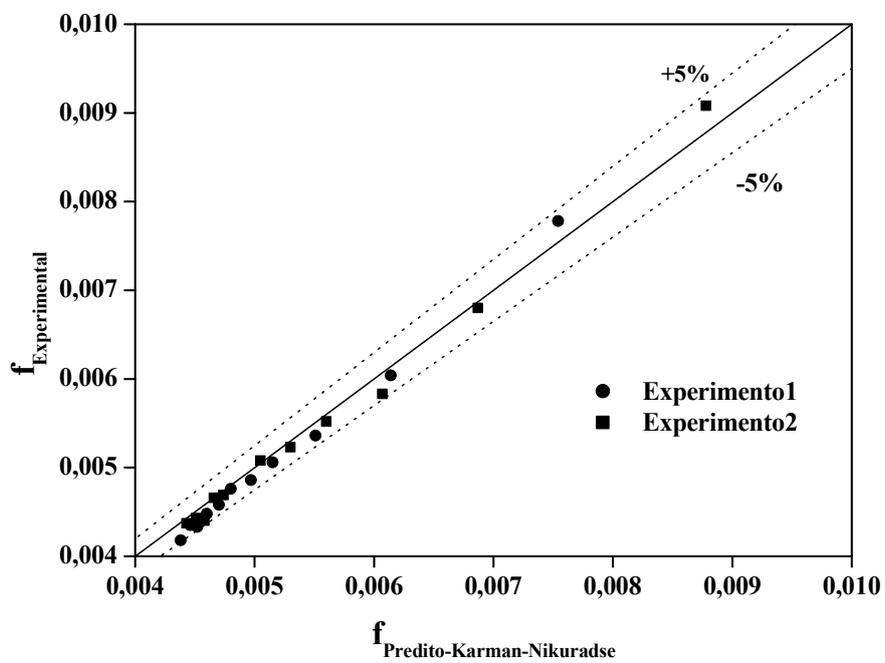
Os dados experimentais de  $v$  e  $\Delta P$  permitiram determinar o fator de atrito de Fanning definido pela Equação 2.16,

$$f = \frac{D\Delta P}{2\rho Lv^2}.$$

Os dados de fator de atrito experimentais, assim como os preditos pela correlação Karman-Nikuradse, Equação 2.22, encontram-se na Figura 4.1. Pode-se observar na Figura 4.2 que os desvios foram sempre menores que 5% em módulo para toda faixa de Reynolds estudada. A boa concordância entre os dados indica que a unidade experimental pode ser utilizada na determinação do fator de atrito para escoamento de outros fluidos. Cabe acrescentar que em tal análise estão incluídos 22 determinações experimentais realizadas durante 2 corridas diferentes, vide Tabelas A1 e A2 do Anexo 1.



**Figura 4.1:** Fator de atrito experimental e predito pela equação de Karman-Nikuradse.



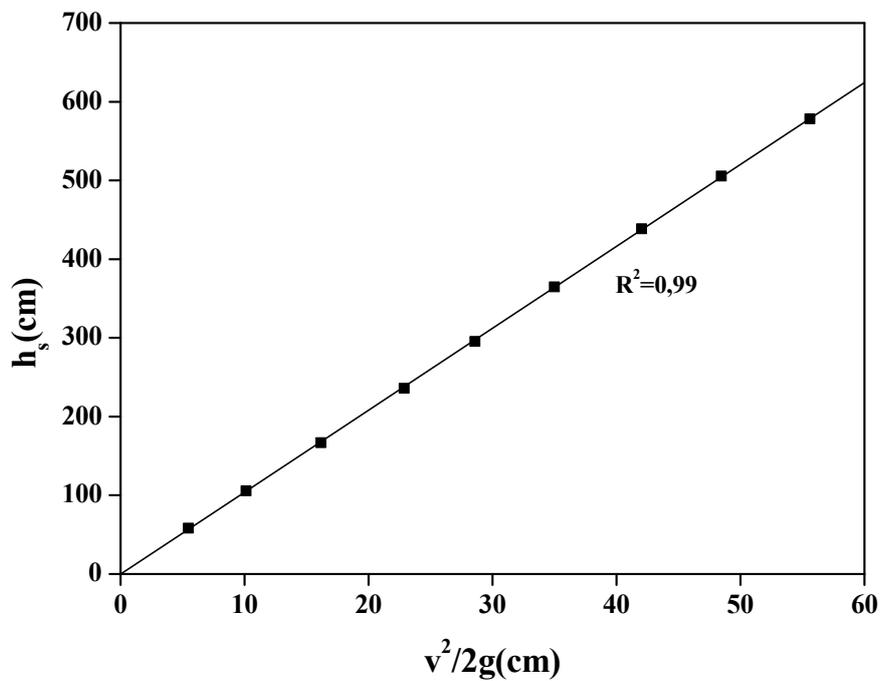
**Figura 4.2:** Desvio entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de Karman-Nikuradse.

### 4.1.2 Coeficiente de perda

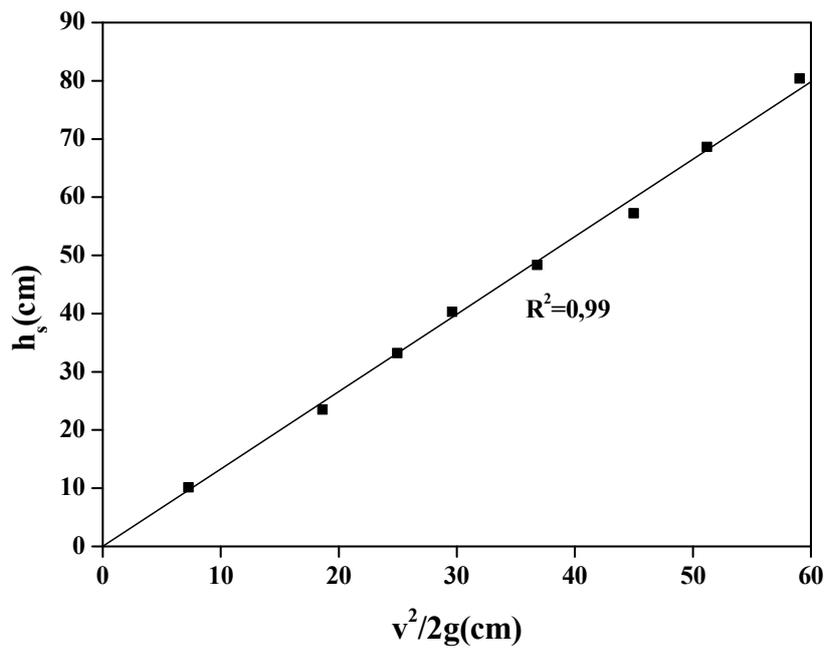
Os dados de  $v$  e  $\Delta P$  obtidos experimentalmente para válvula globo, joelho e redução possibilitaram a determinação dos respectivos coeficientes de perda de carga, ambos definidos pela Equação 2.49,

$$K = \frac{h_s}{v^2/2g} .$$

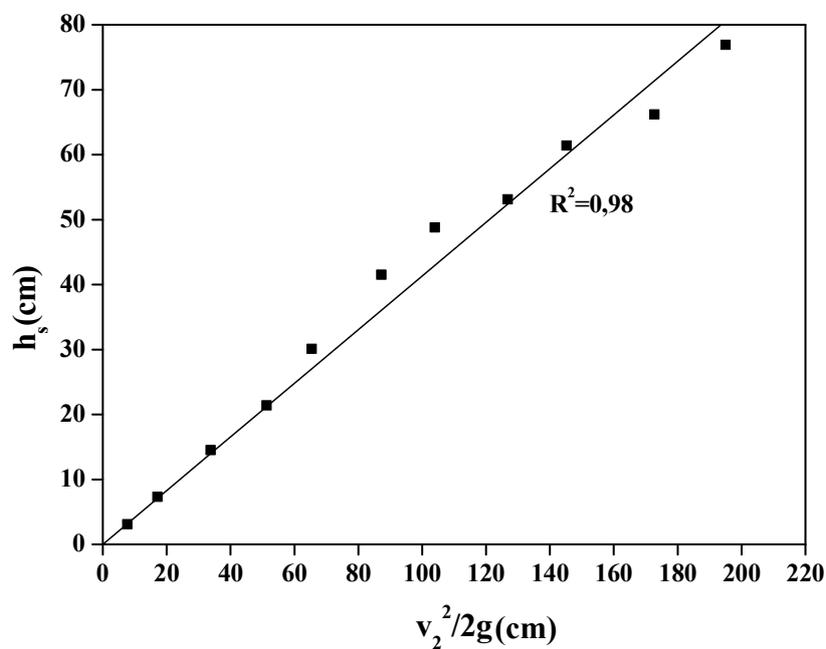
Os coeficientes de perda de carga para válvula globo, joelho 90° e redução 1”-3/4” são apresentados nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Observa-se, nestas figuras, que os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) são próximos de 1 (em todos os casos  $R^2 > 0,98$ ). Os coeficientes de perda de carga mostraram-se independentes do número de Reynolds, isto é, praticamente constante, concordando qualitativamente com os resultados encontrados por CRANE COMPANY (1976) e HOOPER (1981).



**Figura 4.3:** Coeficiente de perda para válvula globo-água.



**Figura 4.4:** Coeficiente de perda para joelho 90°-água.



**Figura 4.5:** Coeficiente de perda para redução 1"-3/4" - água.

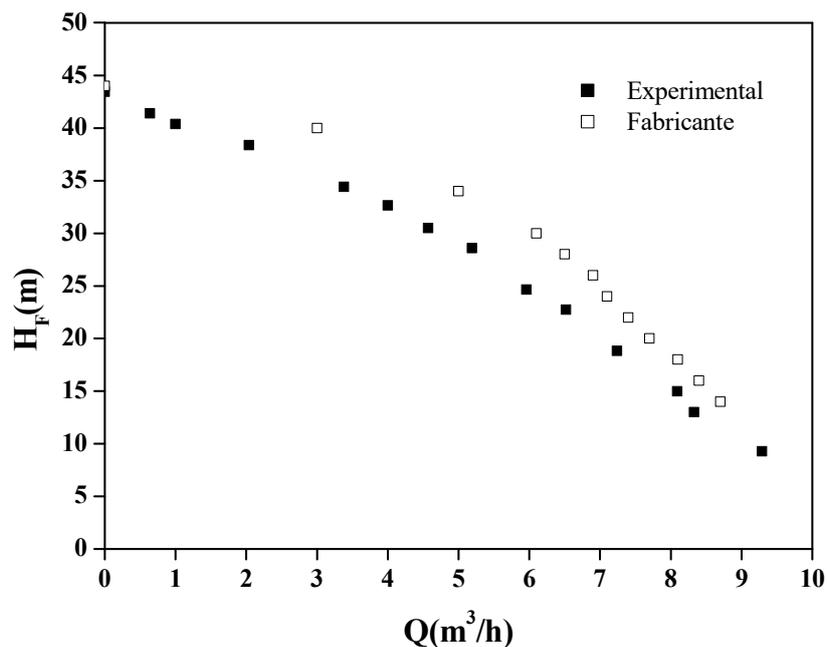
Os resultados experimentais com seus respectivos desvios padrão encontram-se na Tabela 4.1. Constam também, nesta tabela, alguns valores de coeficientes de perda de carga encontrados na literatura. As diferenças observadas entre os coeficientes de perda de carga experimental e os encontrados na literatura podem ser explicadas pelos diferentes materiais (rugosidade da superfície interna) e configurações geométricas dos acidentes utilizados. Apesar disto, os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) próximos de 1 e os baixos desvios padrão,  $\sigma$ , indicam que unidade experimental pode ser usada também na determinação experimental de coeficientes de perda carga para válvula globo, joelho 90° e redução 1”-3/4” de outros tipos de fluidos. Os dados experimentais de coeficiente de perda para válvula globo, joelho e redução, estão nas Tabelas A3, A4 e A5 respectivamente, ambos no Anexo I.

**Tabela 4.1:** Coeficientes de perda de carga experimentais e fornecidos na literatura para o escoamento de água.

Acidentes	Experimental			CRANE COMPANY (1976)	TURIAN <i>et al.</i> (1998)
	K	$\sigma$	$R^2$	K	K
Válvula Globo	10,40	0,10	0,99	7,82	10,0
Joelho 90°	1,33	0,05	0,99	0,69	1,11
Redução	0,41	0,03	0,98	0,20	-

#### 4.1.3 Carga fornecida pela bomba ao fluido

Na Figura 4.6 estão apresentadas a curva característica fornecida pelo fabricante da bomba, no caso a DANCOR, e a obtida experimentalmente, ambas para escoamento de água. Nota-se nesta figura que há diferenças entre a curva fornecida pelo fabricante e obtida neste trabalho. Todavia, o objetivo principal desta etapa do estudo é verificar a influência das propriedades reológicas dos fluidos não-Newtonianos sobre a performance da bomba centrífuga. A curva fornecida pelo fabricante é simplesmente ilustrativa e não contribui para o objetivo deste trabalho. Os dados experimentais de carga fornecida pela bomba ao fluido em função da vazão, fabricante e experimental, estão na Tabela A6 do Anexo I.



**Figura 4.6:** Curva característica da bomba centrífuga-experimental e fornecida pelo fabricante para escoamento de água.

## 4.2 Fluidos não-Newtonianos

Finalizada a etapa de calibração iniciou-se a etapa de obtenção de dados para o escoamento de fluidos não-Newtonianos. Conforme mencionado nos capítulos anteriores, foram usadas soluções aquosas de goma xantana e CMC. Estes dados experimentais de fator atrito, coeficientes de perda de carga e carga fornecida pela bomba ao fluido estão reunidos no Anexo II.

### 4.2.1 Fator de atrito

Os fatores de atrito experimental obtido através da Equação 2.16 foram comparados com os estimados pelas correlações: SHAVER & MERRILL (1959), DODGE & METZNER (1959) e CLAPP (1961) dadas pelas Equações 2.26, 2.29 e 2.33, respectivamente. Outra correlação testada foi a de TOMITA (1959), Equação 2.35, diferentemente das outras correlações, é definida com base no fator de atrito dado pela Equação 2.36.

Comparações entre os fatores de atrito experimental e os estimados pelas quatro correlações testadas podem ser visualizadas nas figuras a seguir. Nestas, são apresentados o fator de atrito em função do número de Reynolds (definido para cada correlação) ou os desvios entre o fator experimental e calculado.

As Figuras 4.7 e 4.9 mostram o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRILL (1959) enquanto as Figuras 4.8 e 4.10 apresentam os desvios entre estes fatores de atrito. Pode-se observar que para a goma xantana (Figura 4.8) os desvios variaram entre -15% para solução com  $n=0,965$  a valores maiores que +90% para solução com  $n=0,399$ . No caso das soluções de CMC estudadas, os desvios foram próximos de 10% em módulo, isto pode ser verificado na Figura 4.10. Comparando as duas soluções poliméricas pode-se dizer que a correlação proposta por

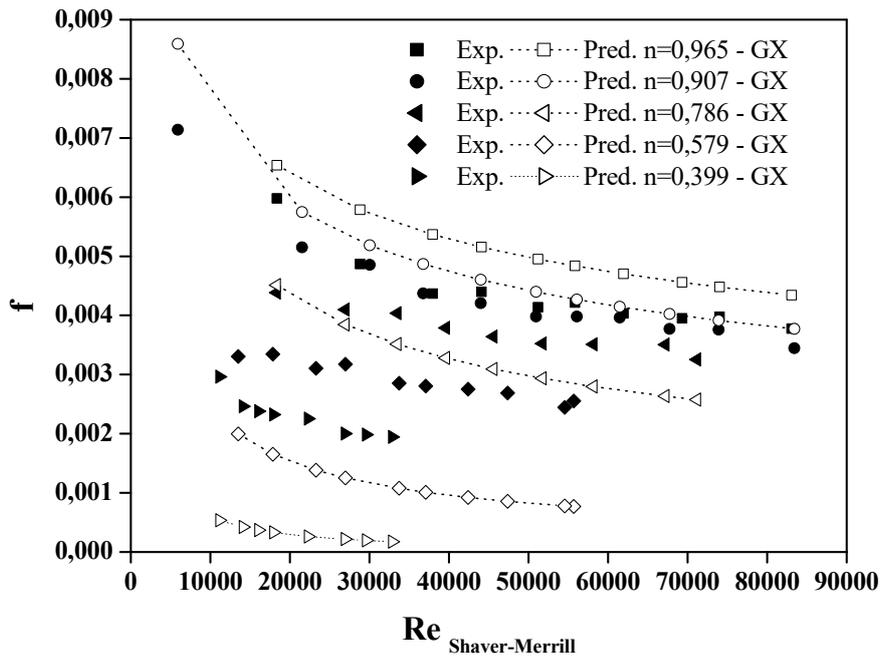
SHAVER & MERRIL (1959) estima fatores com desvios menores que 20% em módulo para soluções com  $0,78 < n < 0,965$ . Outro fato observado no escoamento de soluções de goma xantana é que os valores estimados por esta correlação vão se tornando menores que os experimentais à medida que o índice de comportamento,  $n$ , diminui. Para as soluções de CMC estudadas, este efeito não foi percebido, provavelmente devido à pequena faixa de  $n$  estudada.

Os fatores de atrito experimental e os estimados pela correlação de DODGE & METZNER (1959) foram apresentados nas Figuras 4.11e 4.13 para soluções de goma xantana e CMC, respectivamente. A performance desta equação na predição de fatores de atrito pode ser visualizada na Figura 4.12, no caso de soluções de goma xantana e na Figura 4.14 para soluções de CMC. Pode-se observar, Figuras 4.12 e 4.14, que esta correlação superestima os fatores de atrito, pois na maior parte dos casos, foram superiores aos obtidos experimentalmente. No caso de soluções de goma xantana, os desvios foram entre -15% e -35% para soluções com  $n=0,965$  e  $n=0,397$ , respectivamente. Para faixa de índice de comportamento das soluções de CMC estudadas os desvios foram menores que -10%.

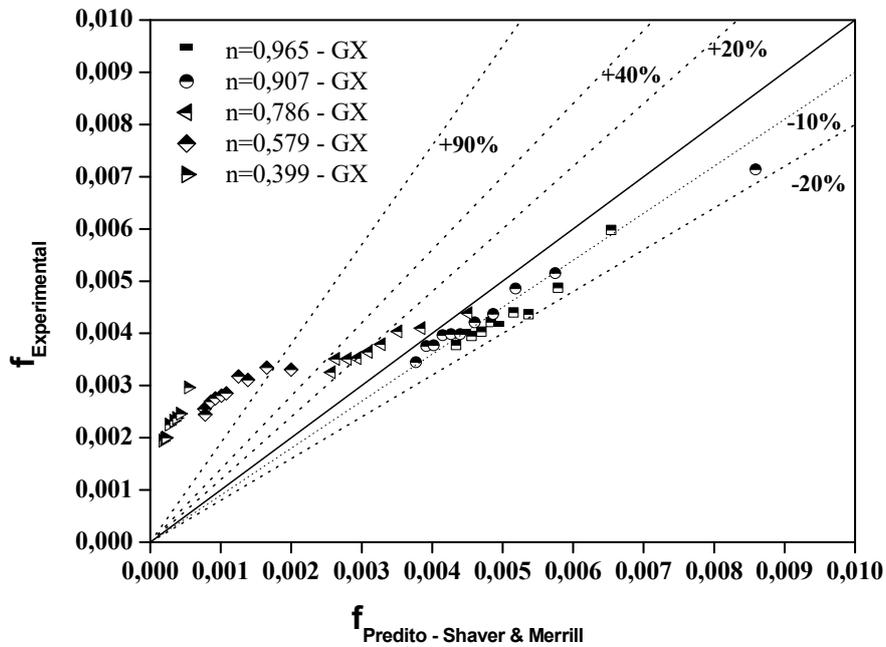
As Figuras 4.15 e 4.17 mostram os fatores de atrito experimentais e os estimados pela correlação de CLAPP (1961), Equação 2.33, para as soluções de goma xantana e CMC, respectivamente. Já as Figuras 4.16 e 4.18 apresentam os desvios entre os valores experimentais e os calculados via equação de CLAPP. Pode-se observar na Figura 4.16 que os desvios entre o fator de atrito experimental e predito estão compreendidos entre -20% e -5%, para toda as soluções de goma xantana estudadas. No caso das soluções de CMC, os desvios ficaram entre -10% e +5% (Figura 4.18).

Os fatores de atrito experimental e predito pela correlação de TOMITA (1959), Equação 2.35, estão apresentados nas Figuras 4.19 e 4.21. A Figura 4.19 mostra os fatores para escoamento de soluções de goma xantana enquanto a Figura 4.21 apresenta os fatores referentes às soluções de CMC. Os desvios entre o experimental e o estimado podem ser observados na Figura 4.20, no caso de goma xantana, e na Figura 4.22 para a solução de CMC. Nota-se nestas duas figuras que esta correlação superestima o fator de atrito, porém em maior grau do que a correlação de DODGE & METZNER (1959). Para soluções de goma xantana os desvios foram entre -20% e -70% para as soluções com  $n=0,965$  e  $n=0,39$ , respectivamente. Já para as soluções de CMC os desvios foram entre -5% e +20%.

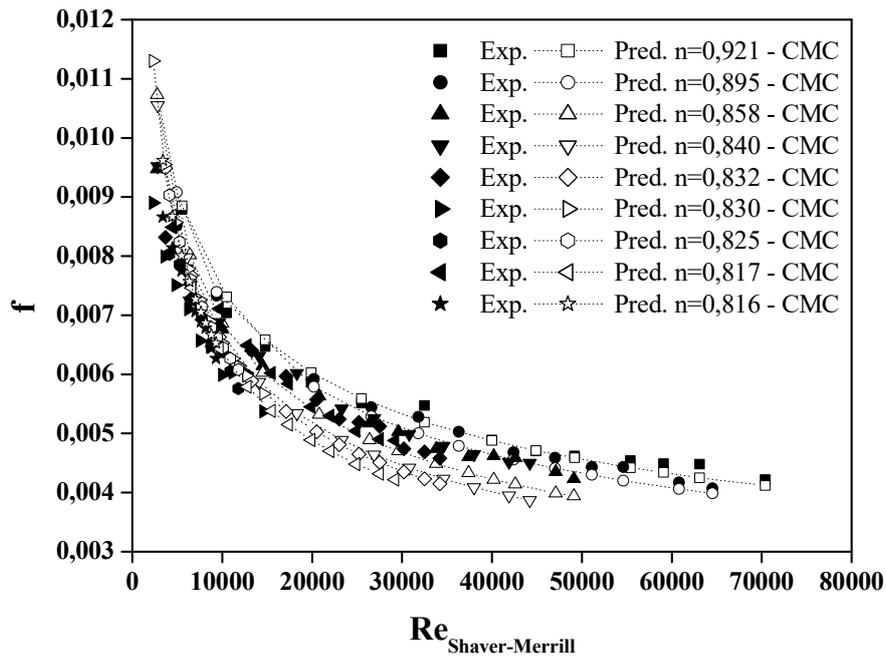
Os dados de fator de atrito experimental e predito pelas correlações testadas estão reunidos nas Tabelas B1 a B14 do Anexo II.



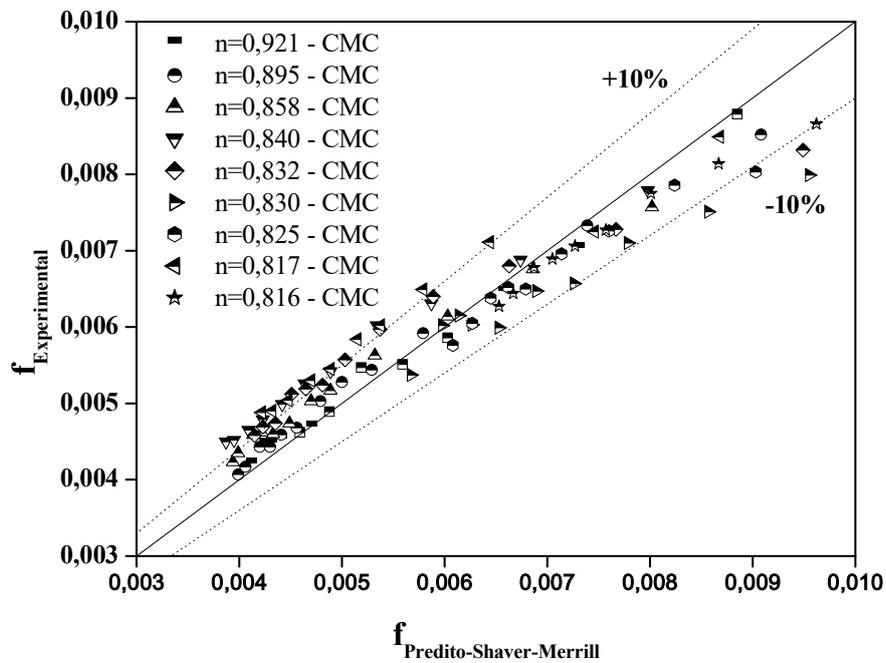
**Figura 4.7:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL-Goma xantana.



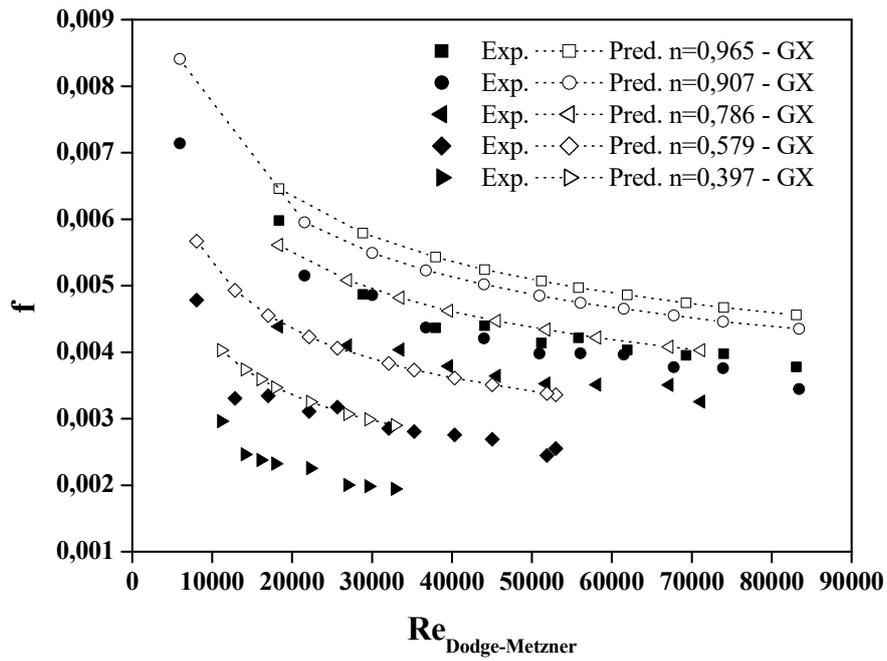
**Figura 4.8:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL-Goma xantana.



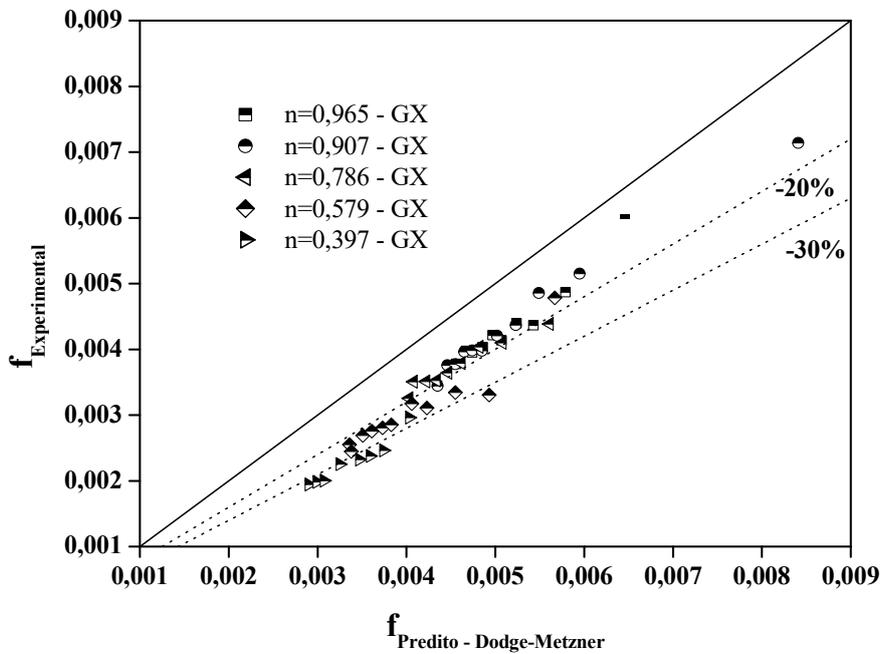
**Figura 4.9:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL-CMC.



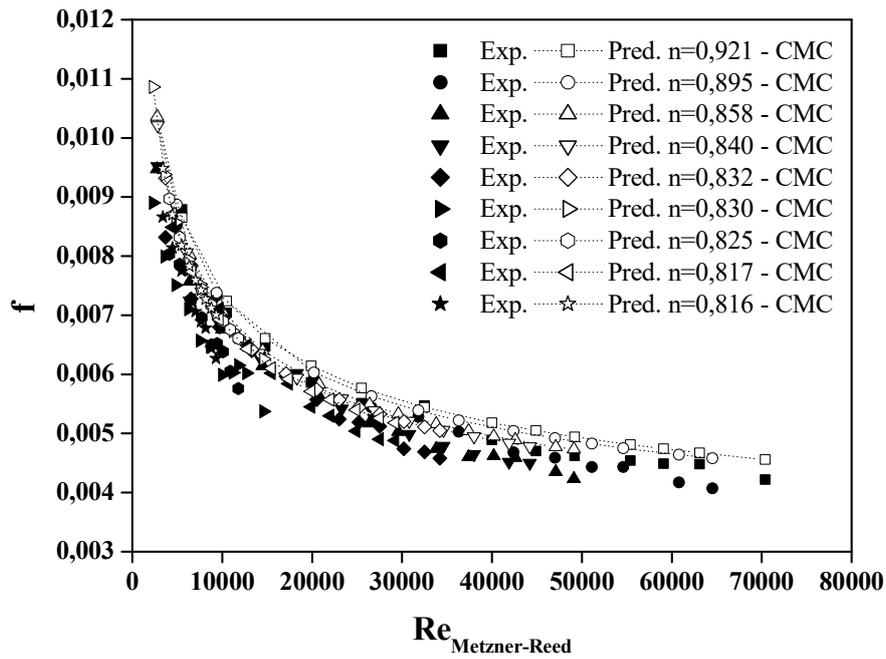
**Figura 4.10:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de SHAVER & MERRIL-CMC.



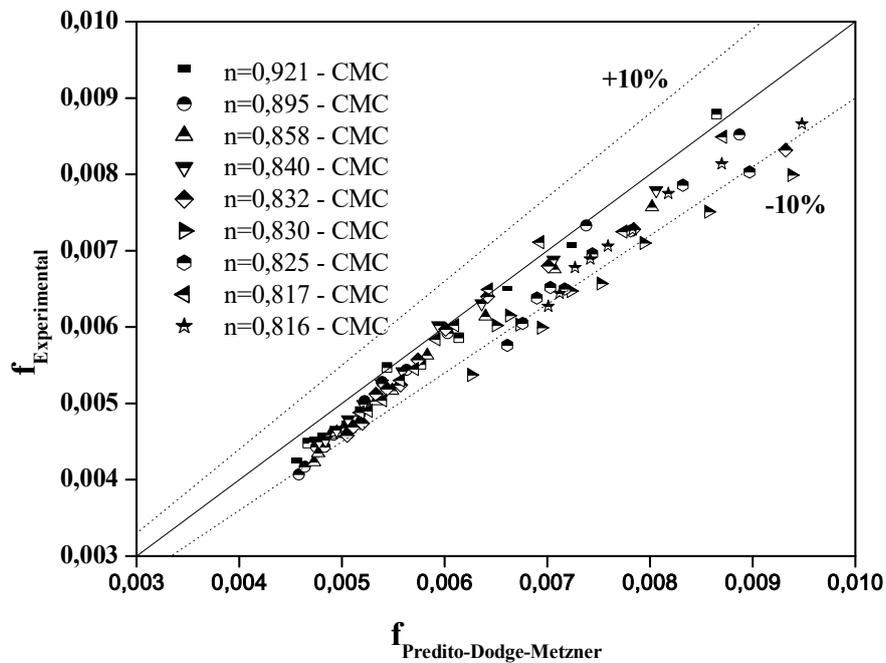
**Figura 4.11:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER–Goma xantana.



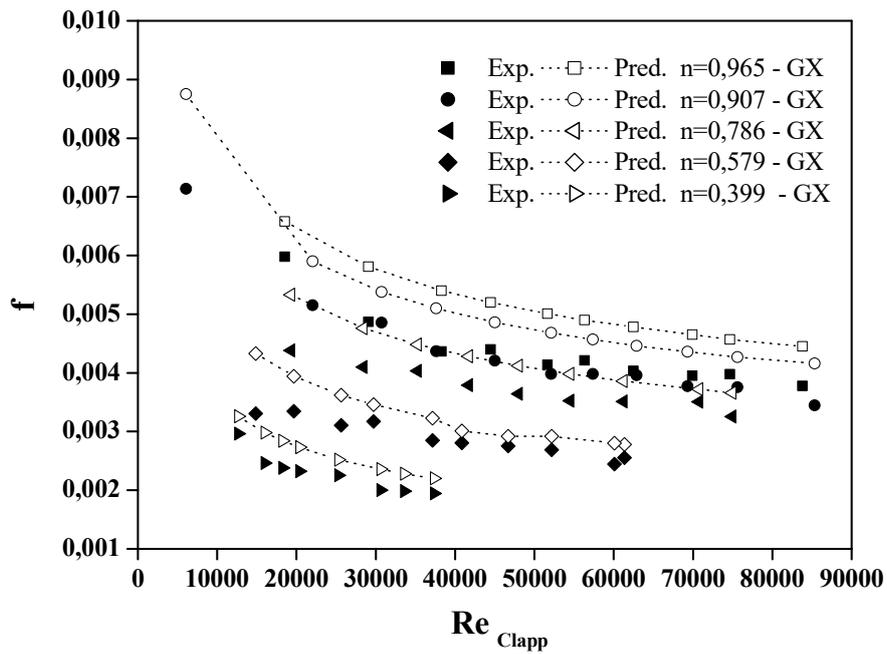
**Figura 4.12:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado correlação de DODGE & METZNER–Goma xantana.



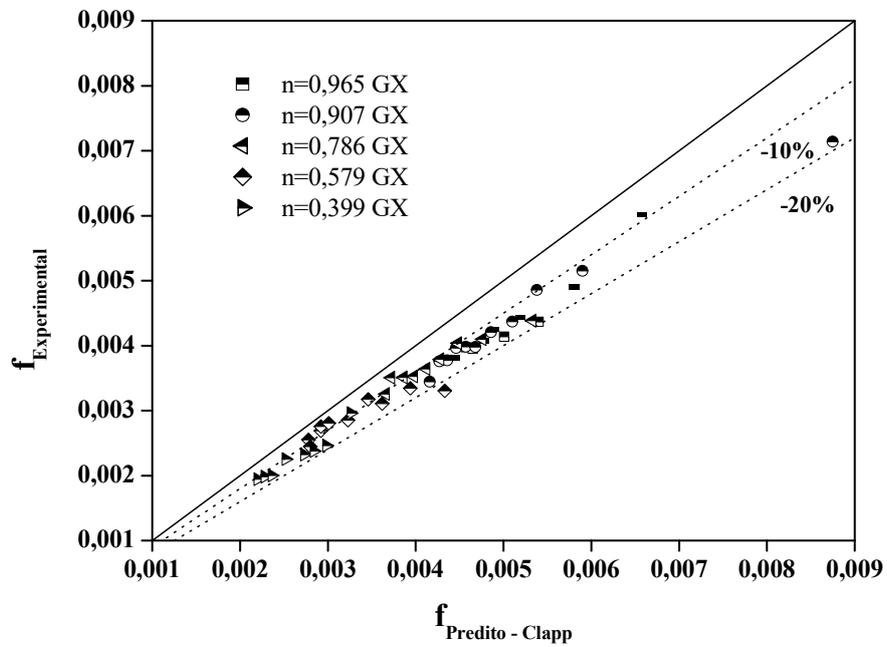
**Figura 4.13:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER–CMC.



**Figura 4.14:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de DODGE & METZNER–CMC.



**Figura 4.15:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP–Goma xantana.



**Figura 4.16:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP–Goma xantana.

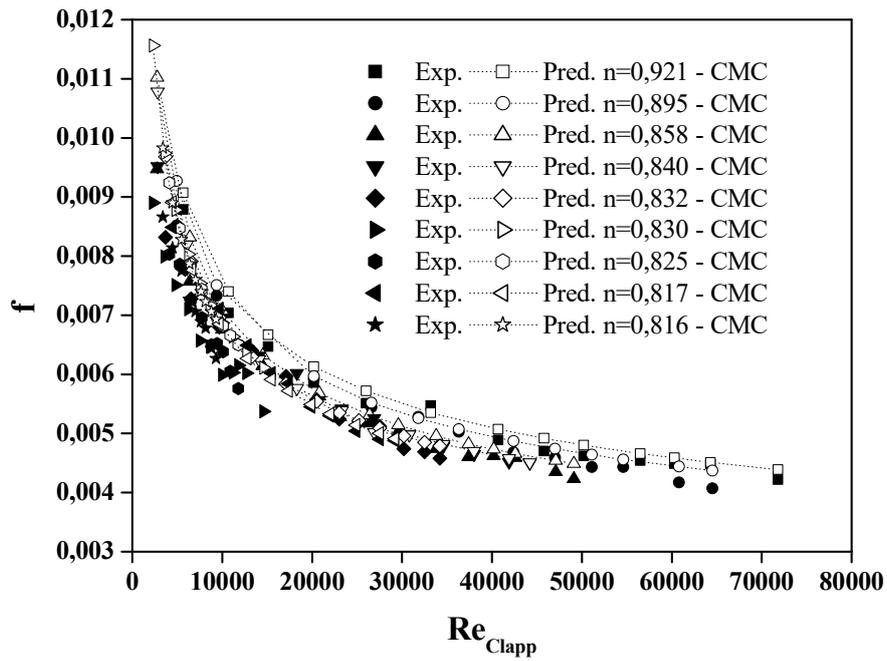


Figura 4.17: Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP–CMC.

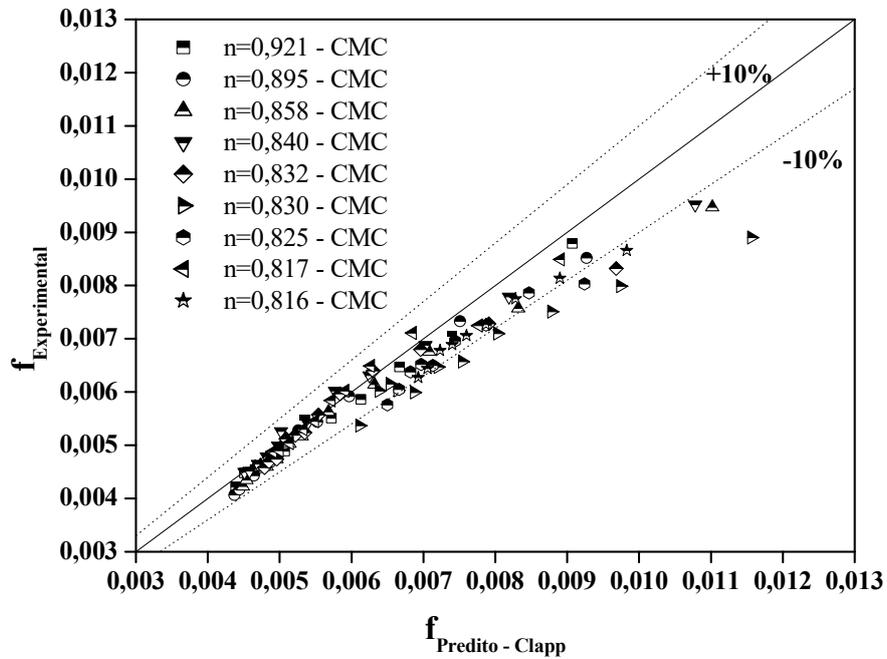
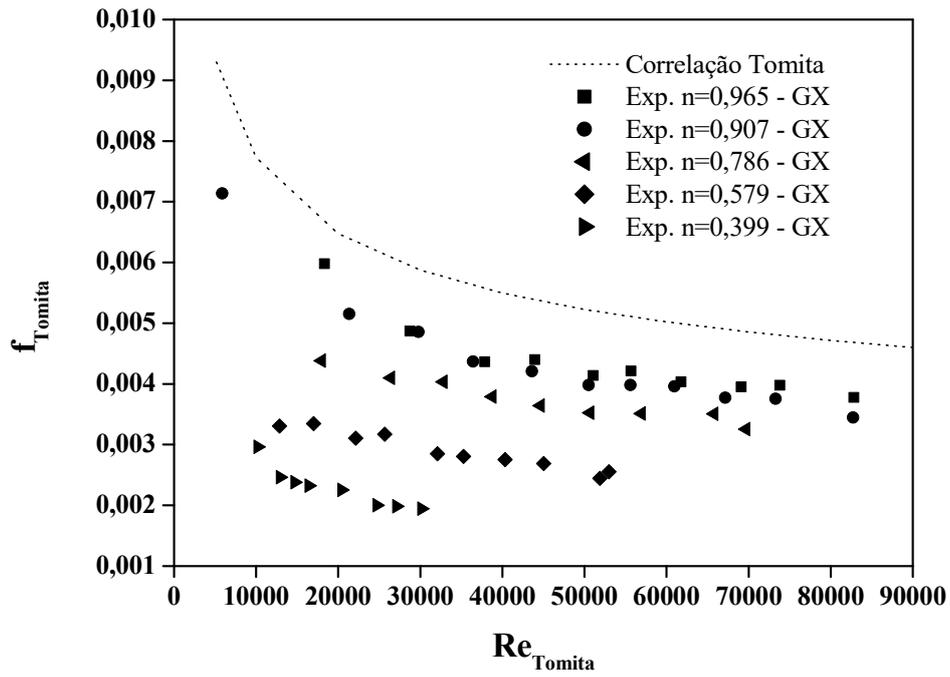
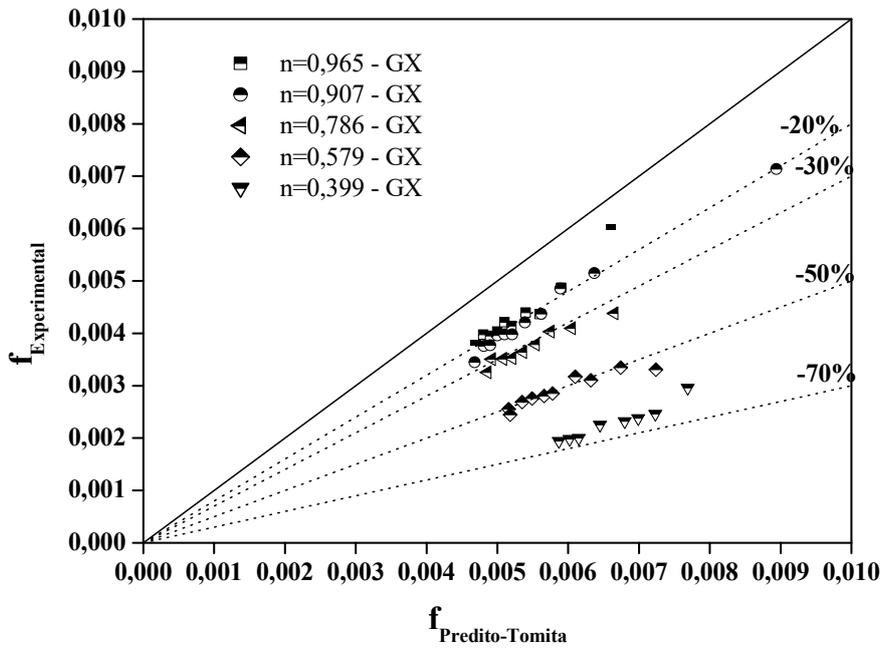


Figura 4.18: Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de CLAPP–CMC.



**Figura 4.19:** Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–Goma xantana.



**Figura 4.20:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–Goma xantana.

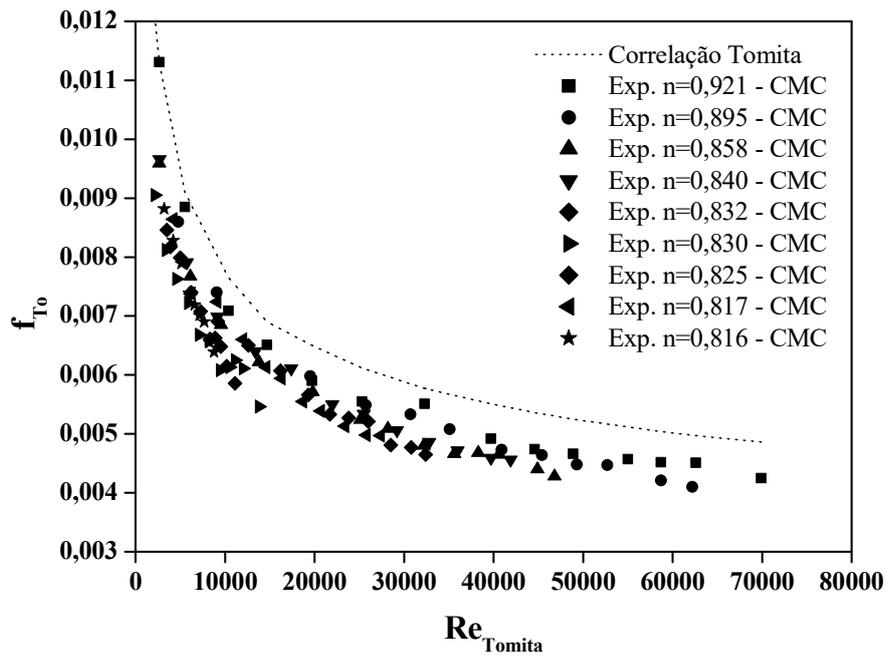


Figura 4.21: Fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–CMC.

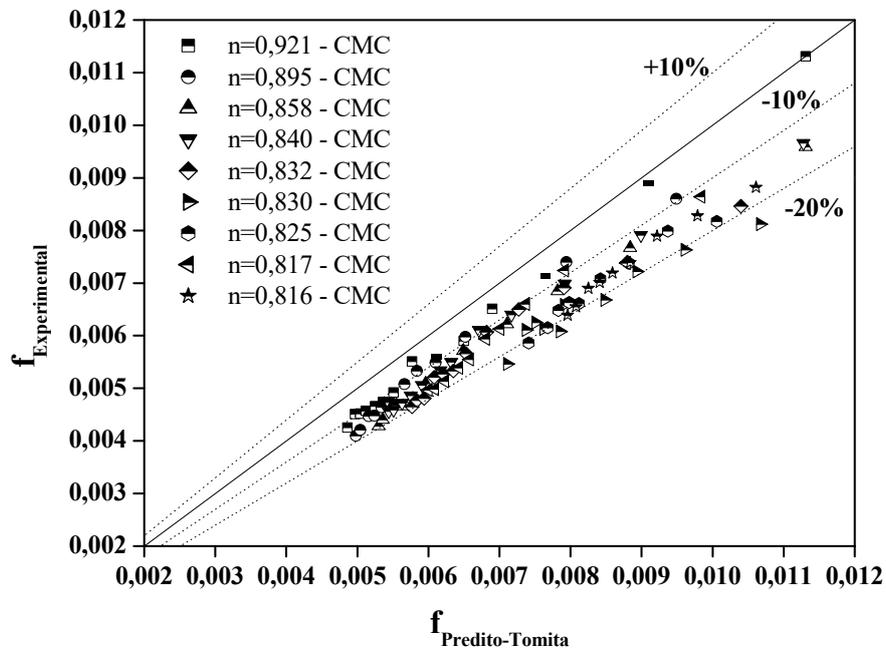


Figura 4.22: Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela correlação de TOMITA–CMC.

#### 4.2.1.1 Correlação proposta

Devido aos desvios entre os dados experimentais de fator de atrito e aqueles obtidos pelas quatro equações testadas, uma nova correlação foi proposta com objetivo de correlacionar melhor os dados encontrados para o escoamento de goma xantana e CMC. Nesta equação, os dados experimentais de fator de atrito foram correlacionados ao número de Reynolds de METZNER & REED (1955) por meio de uma equação do tipo Blasius dada por,

$$f = a \text{Re}_{MR}^{-b} \quad (4.1)$$

Os parâmetros a e b foram obtidos por meio da regressão não linear dos dados experimentais de fator de atrito com seus respectivos números de Reynolds (Equação 2.30), para cada concentração estudada. Estes dados são mostrados na Tabela 4.2 juntamente com seus respectivos coeficientes de correlação ( $R^2$ ).

**Tabela 4.2:** Parâmetros para correlação proposta.

Solução	n	a	b	$R^2$
<b>Goma Xantana</b>	0,965	0,103	0,294	0,943
	0,907	0,070	0,263	0,993
	0,786	0,033	0,204	0,957
	0,579	0,025	0,208	0,908
	0,397	0,090	0,371	0,935
<b>CMC</b>	0,921	0,098	0,282	0,980
	0,895	0,093	0,280	0,994
	0,858	0,082	0,273	0,998
	0,840	0,081	0,271	0,995
	0,832	0,070	0,258	0,977
	0,830	0,062	0,250	0,979
	0,825	0,105	0,306	0,956
	0,817	0,096	0,290	0,976
0,816	0,108	0,310	0,980	

No caso das soluções de goma xantana, os parâmetros a e b puderam ser correlacionados pelas seguintes equações, ambos em função do índice de comportamento, dadas respectivamente por,

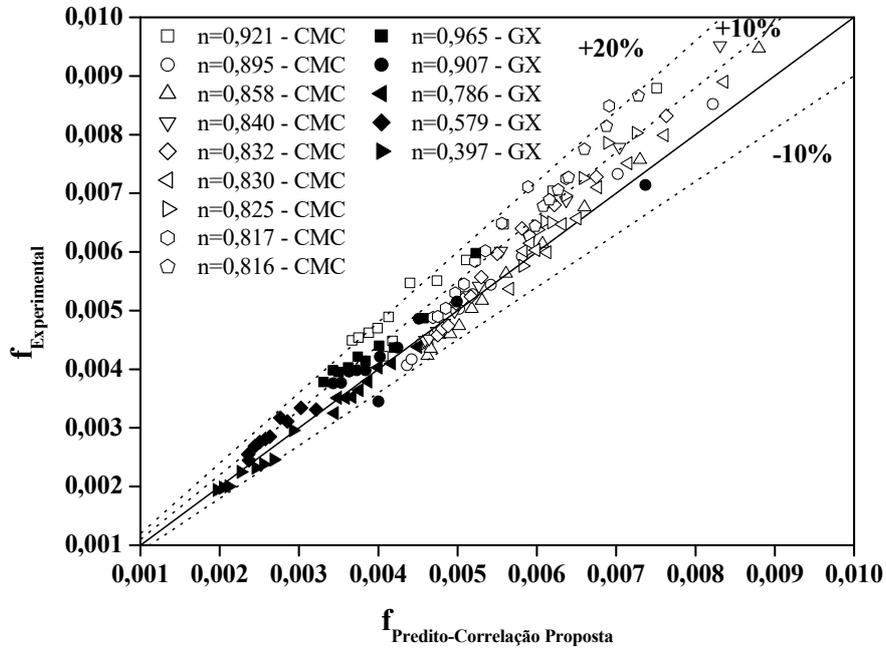
$$a = 0,9625n^2 - 1,289n + 0,4494, \quad (4.2)$$

$$b = 1,8173n^2 + 2,5892n - 1,1086, \quad (4.3)$$

com coeficiente de correlação,  $R^2$ , igual 0,998 para o parâmetro a e 0,983 para o parâmetro b.

Devido a pequena faixa de índice de comportamento alcançada com as soluções de CMC ( $0,816 \leq n \leq 0,92$ ) e pela falta de tendência por parte dos parâmetros (a e b) quando correlacionados com n, não foi possível obter equações similares àquelas determinadas para soluções de goma xantana. Desta forma, as Equações 4.2 e 4.3 foram também utilizadas para determinar os parâmetros a e b das soluções de CMC. A Figura

4.23 apresenta os desvios entre o fator de atrito experimental e calculado pela Equação 4.1 com auxílio da 4.2 e 4.3, para todas as soluções de CMC e goma xantana estudadas. Pode-se observar nesta figura que os desvios, no caso da goma xantana, foram próximos de 10% em módulo. Já os fatores de atrito para soluções de CMC foram correlacionados com desvio entre -10% e +20%.



**Figura 4.23:** Desvios entre o fator de atrito experimental e o estimado pela equação proposta (Equação 4.3) para o escoamento de CMC e goma xantana.

### Tratamento estatístico

Os dados de fator de atrito correspondentes as 151 determinações experimentais, incluindo goma xantana e CMC, foram tratados estatisticamente através de:

- DMA, desvio médio absoluto, dado por,

$$DMA = \frac{100}{n} \left[ \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{\text{exp.}} - f_{\text{pred.}}}{f_{\text{exp.}}} \right| \right] \quad (4.4)$$

O desvio médio absoluto representa a média percentual dos desvios absolutos entre o fator de atrito experimental e predito pelas correlações testadas.

- $\sigma$ , desvio padrão, dado por,

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{f_{\text{exp.}}}{f_{\text{pred.}}} \right)_i - y \right)^2 \right]^{0.5} \quad (4.5)$$

onde  $y$  é média da  $f_{\text{exp}}/f_{\text{pred}}$  dada por,

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{\text{exp.}}}{f_{\text{pred.}}} \right)_i \quad (4.6)$$

Pode-se observar na Tabela 4.3 que a correlação de CLAPP (1961) é a que fornece fatores de atrito mais próximo dos obtidos experimentalmente, dentre as quatro correlações testadas. A equação proposta do tipo Blasius conduz a resultados com desvios bem próximos daqueles oriundos da equação de CLAPP (1961). Todavia, os valores estimados são em média menores que os experimentais enquanto a equação de CLAPP fornece fatores de atrito maiores que o experimentais. Já os desvios padrão e médio absoluto são praticamente iguais para as equações de CLAPP (1961) e equação proposta. Os piores resultados foram obtidos por meio das equações de SHAVER & MERRILL (1959) e TOMITA (1959).

**Tabela 4.3:** Tratamento estatístico aplicado às correlações testadas para todas as determinações realizadas de goma xantana e CMC.

<b>Tratamento Estatístico</b>	<b>SHAVER &amp; MERRILL</b>	<b>DODGE &amp; METZNER</b>	<b>CLAPP</b>	<b>TOMITA</b>	<b>EQUAÇÃO PROPOSTA</b>
$y$	1,49	0,89	0,93	0,79	1,05
$\sigma$	1,66	0,09	0,06	0,14	0,08
<b>DMA %</b>	15,98	13,66	8,66	33,26	6,71

#### 4.2.2 Coeficiente de perda

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 estão apresentadas as curvas de  $h_s$  versus  $v^2/2g$  para válvula globo, joelho 90° e redução 1”-3/4”, respectivamente, para todas soluções poliméricas estudadas. Nestes gráficos a inclinação da reta que passa pela maioria dos pontos representa o coeficiente de perda de carga médio de cada acidente estudado. Pode-se observar nestes que os coeficientes de perda de carga dos acidentes não foram influenciados de maneira significativa pelas propriedades reológicas dos fluidos. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.4, os coeficientes de perda médio de todas as soluções poliméricas foram semelhantes aos obtidos para água, para todos os acidentes estudados. Para válvula globo e joelho os desvios foram menores que 5% enquanto para redução o desvio foi menor que 13%. Os dados experimentais de coeficientes de perda de carga para a válvula globo estão nas Tabelas B15 à B27, para o joelho nas Tabelas B28 à B41 e a redução nas Tabelas B42 à B55, ambas no Anexo II.

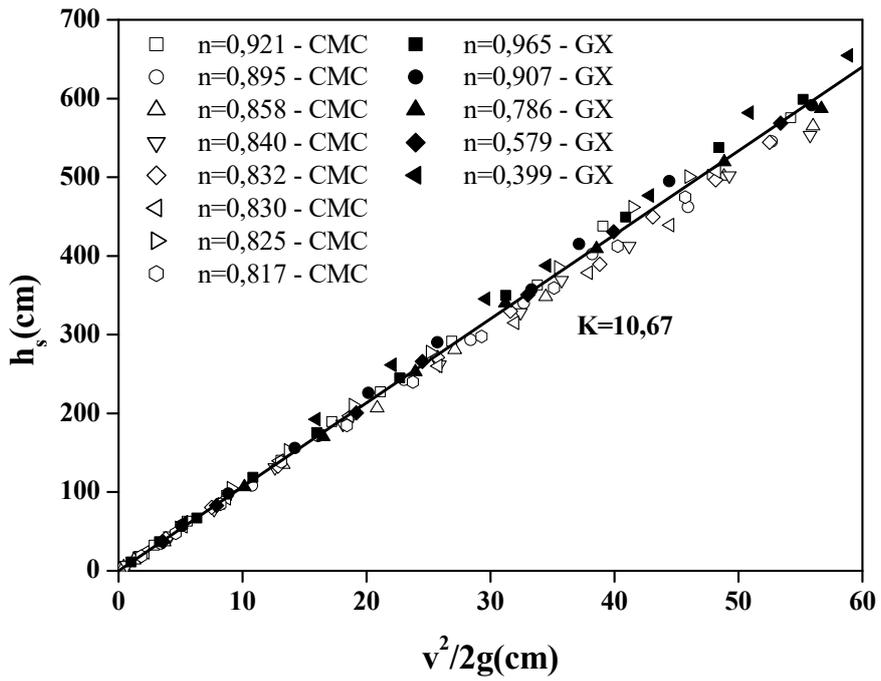


Figura 4.24: Coeficiente de perda para válvula globo–goma xantana e CMC.

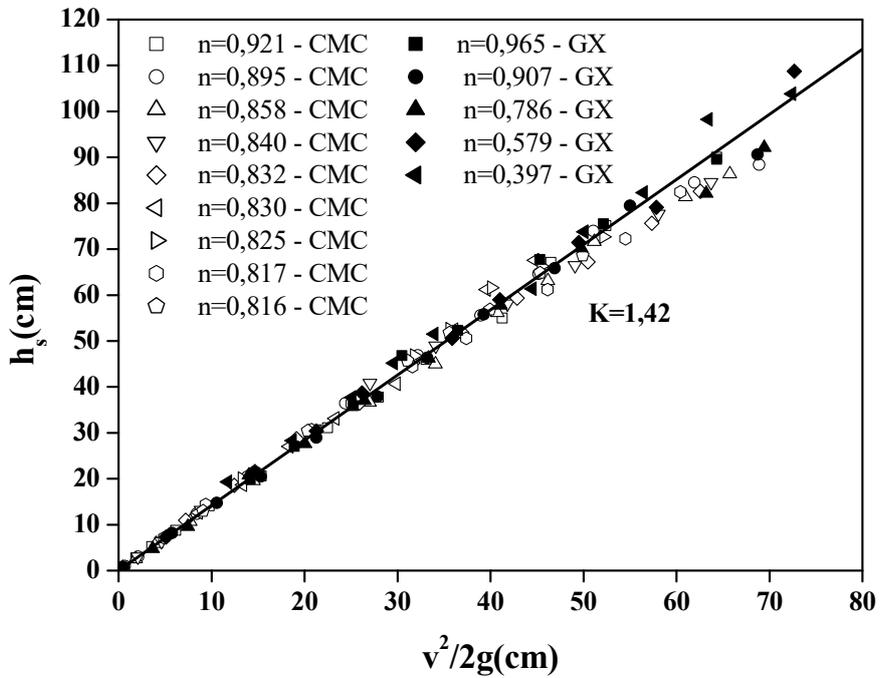


Figura 4.25: Coeficiente de perda para joelho 90°–goma xantana e CMC

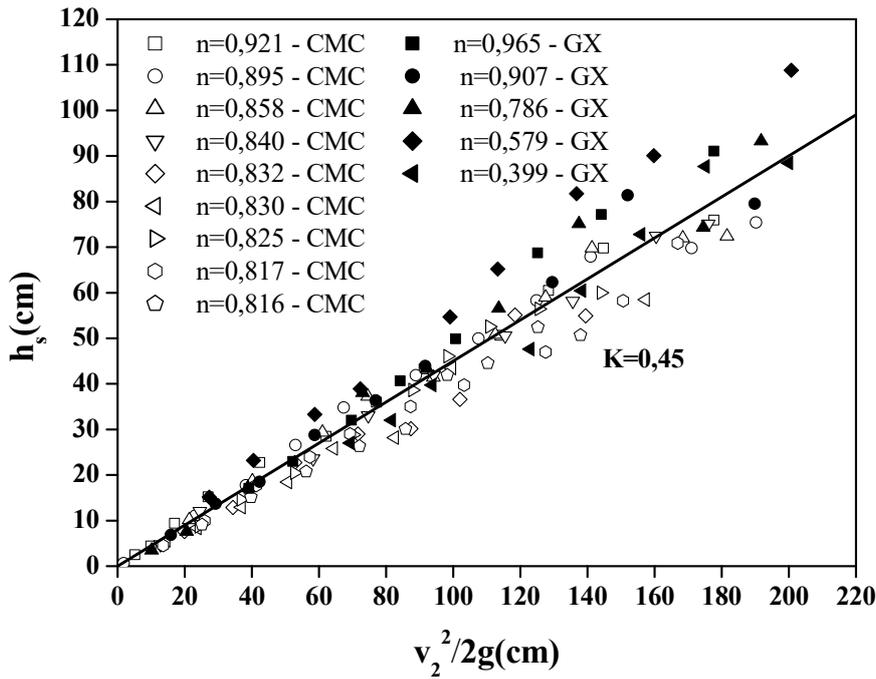


Figura 4.26: Coeficiente de perda para redução 1”-3/4”-goma xantana e CMC.

Tabela 4.4: Coeficientes de perda de carga médio para escoamento turbulento de soluções de goma xantana, CMC e água.

Acidentes	GX			CMC			GX+CMC			Água		
	K	$\sigma$	N	K	$\sigma$	N	K	$\sigma$	N	K	$\sigma$	N
Válvula Globo	10,95	0,40	42	10,53	0,42	84	10,67	0,46	126	10,41	0,10	9
Joelho 90°	1,42	0,07	48	1,42	0,06	93	1,42	0,07	141	1,33	0,05	8
Redução 1-3/4	0,48	0,06	43	0,43	0,05	86	0,45	0,06	129	0,43	0,03	11

N é o número de determinações experimentais.

#### 4.2.3 Carga fornecida pela bomba

A Figura 4.27 apresenta as curvas características das soluções poliméricas estudadas, ou seja, a carga fornecida pela bomba em função da vazão de fluido. Pode-se observar nesta figura que não houve influência significativa dos parâmetros reológicos sobre a carga fornecida pela bomba, pois a curva obtida para o bombeamento da água coincide com as de soluções poliméricas (goma xantana e CMC). O problema no arranque, situação a qual os fluidos passam a se movimentar, quando apresentam elevadas viscosidades efetivas não foi percebido durante o estudo. A degradação mecânica do polímero também não foi observada. As pequenas diferenças observadas entre os parâmetros reológicos (Tabela 3.2), obtidos para uma determinada concentração, são devido à temperatura e não a degradação mecânica. O volume

utilizado nos experimentos (300 litros de solução) pode ter contribuído para a minimização deste problema, pois o número de vezes que uma determinada massa de fluido circulou pela unidade foi pequeno. Dados de carga fornecida pela bomba ( $H_F$ ) e vazão ( $Q$ ) podem ser encontrados na Tabela B56 para solução de goma xantana e na Tabela B57 para soluções de CMC, ambas no Anexo II.

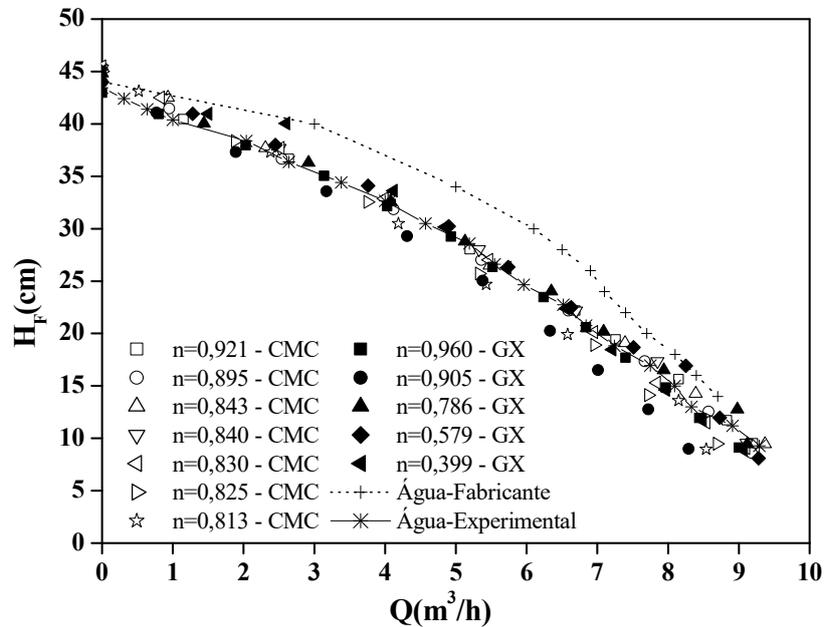


Figura 4.27: Carga fornecida pela bomba centrífuga aos fluidos poliméricos.

### 4.3 Tratamento das Incertezas Experimentais

Com o objetivo de verificar o intervalo de confiança dos dados experimentais de fator atrito, coeficientes de perda de carga e carga fornecida pela bomba, foram feitas análises de incertezas das grandezas experimentais. Estas análises envolveram o cálculo do erro aleatório ( $\varphi_i$ ) provável nos resultados obtidos. Por serem pequenas, as incertezas referentes ao comprimento de tubo reto, densidade, diâmetro, aceleração da gravidade e tempo não foram computadas. Na análise realizada empregou-se fator de abrangência igual a 2 para o cálculo da incerteza, ou seja,  $2\varphi_i$ . Este valor associa ao resultado obtido um nível de confiança aproximado de 95% (LIMA & ABACKERLI, 2000). A seguir serão apresentadas as incertezas obtidas com o escoamento de goma xantana 0,020 (%p/v). As incertezas calculadas para as outras soluções estudadas foram similares aos desta solução. As incertezas devido às medições de perda de pressão nos manômetros em U e de velocidade foram obtidas com auxílio das Equações 4.7 e 4.8 dadas respectivamente por:

$$\varphi_{\Delta P} = g(\rho_M - \rho)\varphi_{\Delta h}, \quad (4.7)$$

$$\varphi_v = \frac{1}{3\rho A} \left( \frac{1}{\Delta t_1} + \frac{1}{\Delta t_2} + \frac{1}{\Delta t_3} \right) \varphi_m, \quad (4.8)$$

## Fator de atrito

A incerteza padrão para o fator de atrito pode ser dada associando as variáveis da Equação 2.16 da seguinte forma:

$$\varphi_f = \pm \left\{ \left[ \left( \frac{D}{2\rho L v^2} \right) \varphi_{\Delta P} \right]^2 + \left[ \left( \frac{\Delta P}{2\rho L v^2} \right) \varphi_D \right]^2 + \left[ \left( -\frac{D\Delta P}{2\rho^2 L v^2} \right) \varphi_\rho \right]^2 + \left[ \left( \frac{D\Delta P}{2\rho L^2 v^2} \right) \varphi_L \right]^2 + \left[ \left( -\frac{D\Delta P}{\rho L v^3} \right) \varphi_v \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (4.9)$$

A incerteza de cada variável envolvida no cálculo do fator de atrito é dada na Tabela 4.5. Pode-se observar na Tabela 4.6 que as incertezas acumuladas no fator de atrito ficaram entre 1 e 11%. A incerteza média foi de aproximadamente  $\pm 5\%$ , para toda faixa de vazão estudada.

**Tabela 4.5:** Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do fator de atrito.

Grandezas	$\varphi_i$
$\Delta h$ (manômetro)	0,15cm
m (balança)	2,5g
D, $\rho$ e $\rho_M$	$\sim 0$
L, g e $\Delta t$	$\sim 0$

**Tabela 4.6:** Incertezas experimentais propagadas no cálculo do fator de atrito.

v (cm/s)	$f_{Exp.}$	$2\varphi_f$	Incerteza relativa (%)
369,08	0,0032	0,0001	3
352,09	0,0035	0,0001	3
312,47	0,0035	0,0001	4
283,99	0,0035	0,0002	4
255,78	0,0036	0,0002	5
227,76	0,0038	0,0002	6
198,43	0,0040	0,0003	8
165,98	0,0041	0,0005	11
120,79	0,0044	0,0001	1
<b>% Incerteza relativa média</b>			<b><math>\pm 5</math></b>

## Coefficiente de perda para válvula globo

Experimentalmente o coeficiente de perda de carga para válvula globo é calculado por,

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} - 4 \frac{fL}{D} \quad (4.10)$$

$\Delta P$  é a perda de pressão calculada pela Equação 3.4,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $v$  é a velocidade média,  $L$  é o comprimento de tudo reto ( $L=L_1+L_2$ ),  $D$  é o diâmetro do tubo e  $f$  é o fator de atrito. A incerteza padrão para o coeficiente de perda pode ser dada por,

$$\begin{aligned} \varphi_K = \pm \left\{ \left[ \left( \frac{2}{\rho v^2} \right) \varphi_{\Delta P} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{2\Delta P}{\rho^2 v^2} \right) \varphi_{\rho} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4\Delta P}{\rho v^3} \right) \varphi_v \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \left( -\frac{4L}{D} \right) \varphi_{f_M} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4f}{D} \right) \varphi_L \right]^2 + \left[ \left( \frac{4fL}{D^2} \right) \varphi_D \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.11) \end{aligned}$$

A incerteza de cada variável envolvida no cálculo do coeficiente de perda de carga para válvula globo está na Tabela 4.7. Observa-se na Tabela 4.8 que as incertezas devido à propagação de erros experimentais estão entre 0,5% e 1,8%. A incerteza relativa média foi igual a 1,3%, para toda faixa de vazão estudada.

**Tabela 4.7:** Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coeficiente de perda da válvula globo.

Grandezas	$\varphi_i$
$\Delta h$ (manômetro)	0,25(cm)
m (Balança)	2,5g
$f_M$ (Tabela 4.6)	0,00005
D, $\rho$ , $\rho_M$ , L, g e $\Delta t$	$\sim 0$

**Tabela 4.8:** Incertezas experimentais propagadas no cálculo do coeficiente de perda da válvula globo.

v (cm/s)	K	$2\varphi_K$	Incerteza relativa (%)
333,51	10,35	0,03	0,5
309,59	10,63	0,03	0,6
275,04	10,61	0,04	0,8
247,47	10,90	0,05	0,9
216,79	10,54	0,06	1,2
179,97	10,32	0,09	1,8
141,19	10,47	0,15	2,9
<b>% Incerteza relativa média</b>			<b>1,3</b>

## Coeficiente de perda para joelho 90°

O coeficiente de perda para joelho de 90° é dado por,

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} - \frac{2g\Delta z}{v^2} - \frac{4fL}{D}. \quad (4.12)$$

$\Delta P$  é a perda de pressão calculada pela Equação 3.5,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $v$  é a velocidade média,  $L$  é o comprimento de tudo reto ( $L=L_1+L_2$ ),  $D$  é o diâmetro do tubo,  $\Delta z$  é a diferença de cota e  $f$  é o fator de atrito. A incerteza padrão para o coeficiente de perda de carga do joelho pode ser dada por,

$$\begin{aligned} \phi_K = \pm \left\{ \left[ \left( \frac{2}{\rho v^2} \right) \phi_{\Delta P} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{2\Delta P}{\rho^2 v^2} \right) \phi_{\rho} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4\Delta P}{\rho v^3} + \frac{4g\Delta z}{v^3} \right) \phi_v \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{2\Delta z}{v^2} \right) \phi_g \right]^2 + \left[ \left( \frac{4L}{D} \right) \phi_{f_M} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4f}{D} \right) \phi_L \right]^2 + \left[ \left( \frac{4fL}{D^2} \right) \phi_D \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

A incerteza de cada variável está na Tabela 4.9. Nota-se na Tabela 4.10 que as incertezas decorrentes da propagação de erros experimentais no cálculo do coeficiente de perda de carga para o joelho estão entre 4% e 18%, sendo a média igual a 8,8%.

**Tabela 4.9:** Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coef. de perda do joelho.

Grandezas	$\phi_i$
$\Delta h$ (manômetro)	0,15(cm)
m (Balança)	2,5g
$f_M$ (Tabela 4.6)	0,00005
D, $\rho$ , $\rho_M$ , L, g, $\Delta z$ e $\Delta t$	$\sim 0$

**Tabela 4.10:** Incertezas exp. propagadas no cálculo do coef. de perda do joelho.

v (cm/s)	K	$2\phi_K$	Incerteza relativa (%)
369,08	1,33	0,06	4
352,09	1,30	0,06	5
312,47	1,41	0,08	5
283,99	1,40	0,09	7
255,78	1,39	0,11	8
227,76	1,40	0,14	10
198,43	1,38	0,19	14
165,98	1,48	0,27	18
120,79	1,29	0,04	3
84,82	1,30	0,07	5
<b>% Incerteza relativa média</b>			<b>8,8</b>

## Coefficiente de perda para redução

O coeficiente de perda para redução pode ser dado por,

$$K = \frac{2\Delta P}{\rho v_2^2} + \frac{v_1^2}{v_2^2} - 1 - \frac{4f_1 L_1 v_1^2}{D_1 v_2^2} - \frac{4f_2 L_2}{D_2} \quad (4.14)$$

Nesta equação,  $\Delta P$  é a perda de pressão calculada pela Equação 3.4,  $v_1$  e  $v_2$  são as velocidades média do fluido no tubo de diâmetro  $D_1$  e  $D_2$ , respectivamente.  $f_1$  é o fator de atrito no tubo com diâmetro igual a  $D_1$ ,  $f_2$  é o fator de atrito no tubo com diâmetro igual a  $D_2$ .  $L_1$  e  $L_2$  são os comprimentos de tubo reto antes e depois da redução, respectivamente, ambos com 50 cm. A incerteza padrão para o coeficiente de perda de carga da redução pode ser dada por,

$$\begin{aligned} \phi_K = \pm & \left\{ \left[ \left( \frac{2v_1^2}{v_2^2} - \frac{8f_1 L_1 v_1^2}{D_1 v_2^2} \right) \phi_{v_1} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4\Delta P}{\rho v_2^3} - \frac{2v_1^2}{v_2^3} + \frac{8f_1 L_1 v_1^2}{D_1 v_2^3} \right) \phi_{v_2} \right]^2 + \right. \\ & + \left[ \left( -\frac{2\Delta P}{\rho^2 v_2^2} \right) \phi_\rho \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4L_1 v_1^2}{D_1 v_2^2} \right) \phi_{f_{1M}} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4L_2}{D_2} \right) \phi_{f_{2M}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{4f_1 L_1 v_1^2}{D_1^2 v_2^2} \right) \phi_{D_1} \right]^2 + \right. \\ & \left. + \left[ \left( \frac{4f_2 L_2}{D_2^2} \right) \phi_{D_2} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4f_1 v_1^2}{D_1 v_2^2} \right) \phi_{L_2} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{4f_2}{D_2} \right) \phi_{L_2} \right]^2 + \left[ \left( \frac{2}{\rho v_2^2} \right) \phi_{\Delta P} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.15) \end{aligned}$$

A incerteza de cada variável está na Tabela 4.11. Pode-se observar na Tabela 4.12 que as incertezas experimentais para o cálculo do coeficiente de perda para redução ficaram entre 5% e 22 %, sendo o valor médio igual a 8,9% (na faixa de vazão estudada).

**Tabela 4.11:** Incerteza de cada variável utilizada no cálculo do coeficiente de perda da redução 1-3/4”.

Grandezas	$\phi_i$
$\Delta h$ (manômetro)	0,15(cm)
m (Balança)	2,5g
$f_{1M}$ e $f_{2M}$ (Tabela 4.6)	0,00005
$D_1, D_2, \rho, \rho_M, L_1, L_2, g, \Delta z$ e $\Delta t$	$\sim 0$

**Tabela 4.12:** Incertezas experimentais propagadas no cálculo do coeficiente de perda da redução 1-3/4”.

$v_2$ (cm/s)	K	$2\phi_K$	Incerteza relativa (%)
613,42	0,49	0,02	5
585,19	0,43	0,02	6
519,33	0,55	0,03	5
471,99	0,50	0,03	7
425,11	0,47	0,04	9
378,54	0,52	0,05	10
275,86	0,44	0,09	22
200,76	0,37	0,02	4
140,98	0,35	0,03	8
<b>% Incerteza relativa média</b>			<b>8,9</b>

### Carga fornecida pela bomba

As incertezas experimentais das grandezas envolvidas na obtenção da curva característica estão relacionadas com a medida da vazão e das pressões manométricas na sucção e no recalque da bomba centrífuga.

A carga fornecida pela bomba ao fluido é dada pela Equação 3.6, dada por,

$$H_F = \frac{P_M - P_V}{\rho g} + H.$$

A incerteza padrão para carga fornecida pela bomba ao fluido,  $H_F$ , pode ser dada por,

$$\begin{aligned} \phi_{H_F} = \pm \left\{ \left[ \left( \frac{1}{\rho g} \right) \phi_{P_M} \right]^2 + \left[ \left( -\frac{1}{\rho g} \right) \phi_{P_V} \right]^2 + [\phi_H]^2 + \right. \\ \left. + \left[ \left( -\frac{P_M - P_V}{\rho^2 g} \right) \phi_\rho \right]^2 + \left[ \left( -\frac{P_M - P_V}{\rho g^2} \right) \phi_g \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

No caso da vazão volumétrica, Q, a incerteza padrão pode ser dada por,

$$\phi_Q = \pm \left\{ \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{\Delta t_1} + \frac{1}{\Delta t_2} + \frac{1}{\Delta t_3} \right) \phi_m \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (4.17)$$

As incertezas das grandezas medidas estão reunidas na Tabela 4.13. Pode-se observar na Tabela 4.14 que as incertezas experimentais devido as pressões medidas no manômetro e no manovacômetro estão entre 3 e 13%, sendo a incerteza média igual a 6%. Nesta tabela são também mostradas as incertezas relacionadas com medida da vazão

volumétrica. A incerteza propagada na medida da vazão devido ao erro da balança de aproximadamente 0,1%.

**Tabela 4.13:** Incerteza de cada variável utilizada no cálculo da carga fornecida pela bomba e da vazão volumétrica.

Grandezas	$\varphi_i$
$P_M$	49033(dina/cm <sup>2</sup> )
$P_V$	33331(dina/cm <sup>2</sup> )
m (Balança)	2,5g
$\rho$	~0
H	~0
g e $\Delta t$	~0

**Tabela 4.14:** Incertezas experimentais propagadas no cálculo da carga fornecida pela bomba ao fluido e da vazão volumétrica.

$H_F$ (cm)	$2\varphi_{HF}$	Incerteza relativa (%)	Q (m <sup>3</sup> /h)	$2\varphi_Q$	Incerteza relativa (%)
9	1	13	9,12	0,010	0,1
13	1	9	8,98	0,009	0,1
17	1	7	7,94	0,008	0,1
20	1	6	7,09	0,007	0,1
24	1	5	6,35	0,006	0,1
29	1	4	5,13	0,005	0,1
33	1	4	4,08	0,005	0,1
36	1	3	2,92	0,004	0,1
40	1	3	1,44	0,002	0,1
45	1	3	0,00	-	-
<b>% Incerteza relativa média</b>		<b>6</b>	<b>% Incerteza relativa média</b>		<b>0,1</b>

As incertezas experimentais em todos casos avaliados foram menores que 10%, em média. Pode-se observar que no caso do fator de atrito e dos coeficientes de perda de carga a maior fonte de erro foi decorrente das medidas de perdas de pressão realizadas com manômetros em U, ou seja, são provenientes da diferença de altura de fluido manométrico ( $\Delta h$ ). Com objetivo de minimizar estes erros, as medidas de perdas de pressão foram realizadas em dois manômetros, um com mercúrio e o outro com tetracloreto de carbono. O manômetro contendo mercúrio foi utilizado para medir grandes quedas de pressão enquanto o com tetracloreto para pequenas quedas. Entretanto, para certas vazões de fluido as quedas de pressão foram pequenas (pequenos valores de  $\Delta h$ ) para serem medidas com precisão no manômetro de mercúrio, mas não puderam ser medidas no monômetro de tetracloreto por que ocasionaria uma diferença de altura de fluido manométrico maior que o comprimento do tubo em U usado. Desta forma, esta impossibilidade fez com que as incertezas experimentais aumentassem.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste estudo e dentro das condições operacionais utilizadas pode-se concluir que as correlações proposta por TOMITA (1959), DODGE & METZNER (1959) e CLAPP (1961) superestimam o fator de atrito para escoamento de goma xantana e CMC para as diversas concentrações estudadas. Das correlações testadas, a correlação de CLAPP (1961) é a que fornece fatores de atrito mais próximos dos experimentais, com  $f_{\text{exp}}/f_{\text{pred}}$  médio igual a 0,93. Já a correlação SHAVER & MERRILL (1959), ao contrário das outras, subestima os valores para o fator de atrito.

A correlação proposta neste trabalho, do tipo Blasius, obtida a partir das determinações experimentais do fator de atrito para goma xantana pode ser usada na estimação do fator de atrito, para ambos tipos de soluções estudadas, com  $f_{\text{exp}}/f_{\text{pred}}$  médio igual a 1,05.

Os coeficientes de perda de carga obtidos para válvula globo, joelho de 90° e redução 1”-3/4” durante o escoamento de soluções de goma xantana e CMC em regime turbulento são constantes e iguais aos obtidos para água, ou seja, independem das propriedades reológicas do fluido.

A carga fornecida pela bomba centrífuga ao fluido também independe das propriedades reológicas do fluido, na faixa de viscosidade estudada. As curvas características obtidas para as diferentes soluções poliméricas são semelhantes à obtida para água.

#### 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em vista os resultados obtidos neste estudo, sugere-se as seguintes abordagens para trabalhos posteriores:

- O fator de atrito em dutos com diâmetros diferentes, com intuito de verificar a influência deste sobre a perda de carga.
- A perda de carga ocasionada na região anular, tubos excêntrico e concêntrico.
- O efeito de redução de arraste.
- Os Coeficientes de perda de carga para outros tipos de acidentes, sendo interessante avaliar a influência do diâmetro e da geometria. No caso de válvulas, pode-se trabalhar com diferentes aberturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley, 1960.

CLAPP, R. M., Turbulent Heat Transfer in PseudoPlastic Non-Newtonian Fluids. International Developments in Heat Transfer, A.S.M.E., Part. III, Sec. A, 1961. Citado por SKELLAND, A. H. P. **Non-Newtonian Flow and Heat Transfer**. New York: John Wiley& Sons, 1967.

COELHO, G., L., V. **Reologia e escoamento turbulento de suspensões de minério de ferro**. Tese de M. Sc., Unicamp, Campinas, 1982.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Tecnologia Química**, v. III, 2<sup>nd</sup> ed. Lisboa: Pergamon Press, 1979.

CRANE COMPANY **Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe**. Technical Paper No. 410, 16<sup>th</sup> printing, Crane Co., 300 Park Avenue, New York, 1976.

DODGE, D. W.; METZNER, A. B. Turbulent flow of non-Newtonian systems. **AIChE J.**, v. 5, n. 2, p. 191-204, 1959.

ERNST, W. D. Investigation of the turbulent shear flow of dilute aqueous CMC solutions. **AIChE J.**, v. 12, n. 3, p. 581-586, 1966.

ETEMAD, S. Gh. Turbulent flow friction loss coefficients of fittings for purely viscous non-Newtonian fluids. **Int. Comm. Mass Transfer**, v. 31, n. 5, p. 763-771, 2004.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, W. M.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 6<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995.

GRANVILLE, P. S. **David Taylor Model Basis Rept.** 1579, 1962. Citado por ERNST, W. D. Investigation of the turbulent shear flow of dilute aqueous CMC solutions. **AIChE J.**, v. 12, n. 3, p. 581-586, 1966.

HARTNETT, J.P.; KOSTIC, M. Turbulent friction factor correlations for power law fluids in circular and non-circular channels. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 17, p. 59-65, 1990.

HOOPER, W. B. The two-k method predicts. **Chem. Eng.**, p. 96-100, August, 1981.

IRVINE, T. F. JR., **Chem. Eng. Commun.**, (1988). Citado por HARTNETT, J.P.; KOSTIC, M. Turbulent friction factor correlations for power law fluids in circular and non-circular channels. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 17, p. 59-65, 1990.

KEMBLOWSKI, Z.; KOLODZIEJSKI, J. Flow resistances of non-Newtonian fluids in transitional and turbulent flow. **International Chemical Engineering**, v. 13, n 2, p. 265-279, 1973.

KITTREDGE, C. P.; ROWLEY, D. S. Resistance coefficients for laminar and turbulent flow through one-half-inch valves and fittings. **Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.**, v. 79, p. 1759-1766, 1957. Citado por PERRY, H. R.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

KOZICKI, C. H.; CHOU, C. H.; TIU, C. Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape. **Chem. Eng. Sci.**, v. 21, p. 261-279, 1966

LIMA, L. G.; ABACKERLI, A. J. Uma revisão sobre a evolução do tratamento da incerteza de medição. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, n.2, p. 56-64, 2000.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de Fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, (1980).

MAEGAVA, L. M.; SANTANA C. C.; MASSARANI, G.; BHATNAGAR, R. K. Comportamento reológico e escoamento turbulento de soluções poliméricas: O efeito de redução no arraste. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUIMICA, 1984, Campinas-SP. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Campinas: Unicamp, 1984. v. 1, p. 113-122.

MASSARANI, G. Viscosímetro capilar de tubos descartáveis. **Revista de Ensino de Física**, v. 2, n. 2, p. 3, 1981.

MASSARANI, G. Fluidos não-Newtonianos e sistemas particulados. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 1999, Campos do Jordão-SP. **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. São Paulo-SP: USP, 1999. v. 1, p. 3-28.

MCCABE, L. W.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

METZNER, A. B.; REED, J. C. Flow of non-Newtonian fluids-correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions. **AIChE J.**, v. 1, n. 4, p. 434-440, 1955.

MOODY, L. F. Friction Factors for pipe flow. **Trans. of the ASME**, v. 68, n. 8, p. 671-684, 1944. Citado por PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

PERREIRA, A. S.; PINHO, F. T. Turbulent pipe flow characteristic of low molecular weight polymer solutions. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 55, p. 321-344, 1994.

PERRY, H. R.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

PINHO, F. T.; WHITELAW, J. H. Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 34, p. 129-144, 1990.

PINHO, F. Characteristic of non-Newtonian fluids, Imp. Coll., Mech. Eng. Dept. report FS/87/35, London, 1987. Citado por PINHO, F. T.; WHITELAW, J. H. Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 34, p. 129-144, 1990.

POLIZELLI, M. A.; MENEGALLI, F. C.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Friction losses in valves and fittings for power-law fluids. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 20, n. 4, p. 455-463, 2003.

SCHUH, S. C. Computer makes surge-pressure calculations useful. **Oil and Gas Journal**, v. 31, p. 96-104, 1964. Citado por MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

SHAVER, R. G.; MERRILL, E. W. Turbulent flow of pseudoplastic polymer solutions in straight cylindrical tubes. **AIChE J.**, v. 5, n. 2, p. 181-188, 1959.

SKELLAND, A. H. P. **Non-Newtonian Flow and Heat Transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1967.

STEFFE, J. F. **Rheological Methods in Process Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. East Lansing: Freeman Press, 1996.

TAM, K. C.; TIU, C. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 66, p. 542-549, 1988. Citado por HARTNETT, J.P.; KOSTIC, M. Turbulent friction factor correlations for power law fluids in circular and non-circular channels. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 17, p. 59-65, 1990.

TOMITA, Y. A study on non-Newtonian flow in pipe lines. **Bulletin JSME**, v. 2, n. 5, p. 10-16, 1959.

TURIAN, R. M.; MA, T. W.; HSU, F. L. G.; SUNG, M. D. J.; PLACKMANN, G. W. Flow of concentrated non-Newtonian slurries: 2. Friction losses in bends, fittings, valves and venturi meters. **Int. Multiphase Flow**, v. 24, n. 2, p. 243-269, 1998.

WELTMANN, R. N. Friction factors for flow of non-Newtonian materials in pipelines. **Ind. Eng. Chem.**, v. 48, n. 3, p. 386-387, 1956.

WELTY, R. J.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**. 3<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

WÓJS, K. Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 48, p. 337-355, 1993.

VIRK, P. S. Drag Reduction Fundamentals. **AICHE J.** v. 21, p. 625-650, 1975.

YOO, S. S. **Heat transfer and friction factors for non-Newtonian fluids in circular tubes**, Ph D. Thesis, University of Illinois, Chicago, 1974. Citado por HARTNETT, J.P.; KOSTIC, M. Turbulent friction factor correlations for power law fluids in circular and non-circular channels. **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, v. 17, p. 59-65, 1990.

## INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

### ANEXOS

<b>Anexo I:</b> Dados experimentais para o escoamento de água; fator de atrito, coeficientes de perda e carga fornecida pela bomba. ....	63
<b>Tabela A1:</b> Dados de fator de atrito para água - experimento 1.....	63
<b>Tabela A2:</b> Dados de fator de atrito para água - experimento 2.....	63
<b>Tabela A3:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo - água .....	64
<b>Tabela A4:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho de 90° - água .....	64
<b>Tabela A5:</b> Dados de coeficiente de perda para Redução 1-3/4 - água.....	64
<b>Tabela A6:</b> Dados para curva característica da bomba para o escoamento de água - Fabricante e experimental.....	65
<b>Anexo II:</b> Dados experimentais de fator de atrito, coeficientes de perda e carga fornecida pela bomba, para não-Newtonianos .....	66
<b>Tabela B1:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, $n=0,965$ .....	66
<b>Tabela B2:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, $n=0,907$ .....	67
<b>Tabela B3:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, $n=0,786$ .....	68
<b>Tabela B4:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, $n=0,579$ .....	69
<b>Tabela B5:</b> Dados de fator de atrito para goma xantana, $n=0,399$ .....	70
<b>Tabela B6:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n=0,921$ .....	71
<b>Tabela B7:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n=0,895$ .....	72
<b>Tabela B8:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n=0,858$ .....	73
<b>Tabela B9:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n =0,840$ .....	74
<b>Tabela B10:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n=0,832$ .....	75
<b>Tabela B11:</b> Dados de fator de atrito para CMC, $n=0,817$ .....	76

<b>Tabela B12:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,830.....	77
<b>Tabela B13:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,825.....	78
<b>Tabela B14:</b> Dados de fator de atrito para CMC, n=0,816.....	79
<b>Tabela B15:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,979.....	80
<b>Tabela B16:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,906.....	80
<b>Tabela B17:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,799.....	81
<b>Tabela B18:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,579.....	81
<b>Tabela B19:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana, n=0,397.....	82
<b>Tabela B20:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,933.....	82
<b>Tabela B21:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,895.....	83
<b>Tabela B22:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,858.....	83
<b>Tabela B23:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,8403.....	84
<b>Tabela B24:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,832.....	84
<b>Tabela B25:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,817.....	85
<b>Tabela B26:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,830.....	85
<b>Tabela B27:</b> Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC, n=0,825.....	86
<b>Tabela B28:</b> Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°- goma xantana, n=0,965.....	86
<b>Tabela B29:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-goma xantana, n=0,907.....	87

<b>Tabela B30:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-goma xantana, n=0,786	87
<b>Tabela B31:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-goma xantana, n=0,579	88
<b>Tabela B32:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-goma xantana, n=0,397	88
<b>Tabela B33:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,921 .....	89
<b>Tabela B34:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,895 .....	89
<b>Tabela B35:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,858 .....	90
<b>Tabela B36:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,840 .....	90
<b>Tabela B37:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,832 .....	91
<b>Tabela B38:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,817 .....	91
<b>Tabela B39:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,830 .....	92
<b>Tabela B40:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,825 .....	92
<b>Tabela B41:</b> Dados de coef. de perda para Joelho 90°-CMC, n=0,8164 .....	93
<b>Tabela B42:</b> Dados de coef. de perda para redução-goma xantana, n=0,965 ....	93
<b>Tabela B43:</b> Dados de coef. de perda para redução-goma xantana, n=0,907 ....	94
<b>Tabela B44:</b> Dados de coef. de perda para redução-goma xantana, n=0,786 ....	94
<b>Tabela B45:</b> Dados de coef. de perda para redução-goma xantana, n=0,579 ....	95
<b>Tabela B46:</b> Dados de coef. de perda para redução-goma xantana, n=0,399 ....	95
<b>Tabela B47:</b> Dados de coef. de perda para redução-CMC, n=0,921 .....	96
<b>Tabela B48:</b> Dados de coef. de perda para redução-CMC, n=0,895 .....	96
<b>Tabela B49:</b> Dados de coef. de perda para redução-CMC, n=0,858 .....	97
<b>Tabela B50:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,840 .....	97
<b>Tabela B51:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,832 .....	98
<b>Tabela B52:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,817 .....	98
<b>Tabela B53:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, n=0,830 .....	99

<b>Tabela B54:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, $n=0,825$ .....	99
<b>Tabela B55:</b> Dados de coeficiente de perda para redução-CMC, $n=0,816$ .....	100
<b>Tabela B56:</b> Dados de vazão e carga fornecida pela bomba–goma xantana.....	100
<b>Tabela B57:</b> Dados de vazão e carga fornecida pela bomba–CMC .....	101

## ANEXO I

### Experimentos com água

**Tabela A1:** Dados de fator de atrito para água - experimento 1.

v (cm/s)	T (°C)	$\mu$ (g/cms)	Re	$\Delta P$ (dina/cm <sup>2</sup> )	f <sub>exp</sub>	f <sub>KN</sub>
341,86	30,0	0,00797	1,13E+05	142101,8	0,00418	0,00438
314,17	30,2	0,00794	1,05E+05	124802,4	0,00435	0,00446
292,20	30,4	0,00791	9,78E+04	107503,1	0,00433	0,00452
266,59	30,5	0,00789	8,94E+04	92675,1	0,00448	0,00460
241,61	30,7	0,00786	8,14E+04	77847,1	0,00458	0,00470
217,53	31,0	0,00781	7,37E+04	65490,4	0,00476	0,00480
184,64	31,1	0,00779	6,27E+04	48191,0	0,00486	0,00497
156,66	31,3	0,00776	5,34E+04	36138,6	0,00506	0,00515
115,33	31,5	0,00772	3,95E+04	20743,0	0,00536	0,00551
72,45	31,7	0,00769	2,49E+04	9225,6	0,00604	0,00614
31,83	31,8	0,00767	1,10E+04	2291,7	0,00778	0,00754

**Tabela A2:** Dados de fator de atrito para água - experimento 2.

v (cm/s)	T (°C)	$\mu$ (g/cms)	Re	$\Delta P$ (dina/cm <sup>2</sup> )	f <sub>exp</sub>	f <sub>KN</sub>
350,00	26,8	0,00855	1,08E+05	155694,1	0,00437	0,00443
318,65	26,9	0,00853	9,88E+04	130980,8	0,00443	0,00451
296,37	27,0	0,00851	9,21E+04	112445,8	0,00440	0,00458
271,62	27,1	0,00849	8,46E+04	100089,1	0,00466	0,00466
250,07	27,2	0,00848	7,81E+04	85261,1	0,00469	0,00474
185,17	27,5	0,00842	5,82E+04	50662,4	0,00508	0,00505
148,03	27,8	0,00836	4,68E+04	33363,0	0,00523	0,00530
115,91	28,0	0,00833	3,68E+04	21565,6	0,00552	0,00560
81,81	28,2	0,00829	2,61E+04	11341,0	0,00583	0,00607
49,07	28,4	0,00825	1,57E+04	4759,7	0,00680	0,00687
19,45	28,6	0,00822	6,26E+03	999,0	0,00908	0,00878

**Tabela A3:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-água.

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b>T</b> <b>(°C)</b>	<b>μ</b> <b>(g/cms)</b>	<b>Re</b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
330,42	25,2	0,00886	9,8E+04	578,36	55,60	10,40
308,47	25,4	0,00882	9,2E+04	505,51	48,46	10,43
287,29	25,6	0,00878	8,6E+04	438,61	42,03	10,44
262,13	26,0	0,00871	7,9E+04	364,61	34,99	10,42
236,96	26,2	0,00867	7,2E+04	295,31	28,59	10,33
211,95	26,3	0,00865	6,5E+04	235,79	22,88	10,31
178,21	26,5	0,00861	5,5E+04	166,94	16,17	10,32
141,11	26,6	0,00859	4,3E+04	105,42	10,14	10,40
103,69	26,7	0,00857	3,2E+04	58,34	5,48	10,65
<b>K<sub>m</sub>=10,41±0,10</b>						

**Tabela A4:** Dados de coeficiente de perda para joelho de 90°-água.

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b>T</b> <b>(°C)</b>	<b>μ</b> <b>(g/cms)</b>	<b>Re</b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
340,48	24,2	0,00907	9,9E+04	80,37	59,04	1,36
317,07	24,3	0,00905	9,5E+04	68,61	51,20	1,34
297,23	24,4	0,00903	8,7E+04	57,21	44,99	1,27
268,88	24,6	0,00899	7,9E+04	48,36	36,82	1,31
241,12	24,8	0,00895	7,1E+04	40,30	29,61	1,36
221,41	24,9	0,00893	6,5E+04	33,20	24,97	1,33
191,20	25,0	0,00891	5,7E+04	23,52	18,62	1,26
119,40	25,2	0,00886	3,6E+04	10,16	7,26	1,40
<b>K<sub>m</sub>=1,33±0,05</b>						

**Tabela A5:** Dados de coeficiente de perda para redução 1"-3/4"-água.

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b>T</b> <b>(°C)</b>	<b>μ</b> <b>(g/cms)</b>	<b>Re</b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>V<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
372,28	20,0	0,01002	9,80E+04	76,9	195,0	0,39
350,34	20,1	0,00999	9,24E+04	66,2	172,7	0,38
321,32	20,2	0,00997	8,50E+04	61,4	145,2	0,42
300,26	20,4	0,00992	7,98E+04	53,1	126,8	0,42
271,88	21,0	0,00978	7,33E+04	48,8	104,0	0,47
248,98	21,1	0,00976	6,73E+04	41,5	87,2	0,48
215,57	21,2	0,00973	5,84E+04	30,1	65,4	0,46
190,92	21,4	0,00969	5,20E+04	21,4	51,3	0,42
154,93	21,5	0,00966	4,23E+04	14,5	33,8	0,43
110,21	21,6	0,00964	3,01E+04	7,3	17,1	0,43
73,93	21,9	0,00957	2,04E+04	3,1	7,7	0,40
<b>K<sub>m</sub>=0,43±0,03</b>						

**Tabela A6:** Dados para curva característica da bomba, escoamento de água-fabricante e experimental.

<b>Fabricante</b>		<b>Experimental</b>	
<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H<sub>F</sub></b> <b>(m)</b>	<b>Q</b> <b>(m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H<sub>F</sub></b> <b>(m)</b>
8,70	14,00	9,29	9,27
8,40	16,00	8,91	11,18
8,10	18,00	8,33	13,01
7,70	20,00	8,09	14,99
7,40	22,00	7,75	16,94
7,10	24,00	7,24	18,83
6,90	26,00	6,84	20,77
6,50	28,00	6,52	22,74
6,10	30,00	5,96	24,64
5,00	34,00	5,55	26,60
3,00	40,00	5,19	28,58
0,00	44,00	4,57	30,50
		4,00	32,66
		3,38	34,41
		1,00	40,37
		0,31	42,42
		0,00	43,45

## ANEXO II

### Experimentos com fluidos não-Newtonianos

**Tabela B1:** Dados de fator de atrito para goma xantana,  $n=0,965$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0144$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
355,27	859	8,38E+04	8,28E+04	8,31E+04	0,00378	0,00379	0,00445	0,85	0,00468	0,81	0,00456	0,83	0,00434	0,87
317,72	768	7,47E+04	7,38E+04	7,40E+04	0,00398	0,00399	0,00457	0,87	0,00480	0,83	0,00467	0,85	0,00448	0,89
298,18	721	6,99E+04	6,91E+04	6,93E+04	0,00395	0,00396	0,00465	0,85	0,00487	0,81	0,00474	0,83	0,00456	0,87
267,48	646	6,25E+04	6,18E+04	6,19E+04	0,00403	0,00404	0,00478	0,84	0,00499	0,81	0,00486	0,83	0,00470	0,86
241,97	585	5,63E+04	5,57E+04	5,58E+04	0,00421	0,00423	0,00490	0,86	0,00510	0,83	0,00497	0,85	0,00483	0,87
222,53	538	5,16E+04	5,11E+04	5,12E+04	0,00414	0,00415	0,00501	0,83	0,00520	0,80	0,00507	0,82	0,00495	0,84
192,57	465	4,45E+04	4,40E+04	4,41E+04	0,00440	0,00441	0,00520	0,85	0,00538	0,82	0,00524	0,84	0,00516	0,85
166,66	403	3,83E+04	3,79E+04	3,80E+04	0,00437	0,00438	0,00540	0,81	0,00557	0,79	0,00543	0,80	0,00537	0,81
127,72	309	2,91E+04	2,87E+04	2,88E+04	0,00487	0,00488	0,00581	0,84	0,00593	0,82	0,00579	0,84	0,00579	0,84
82,64	200	1,85E+04	1,83E+04	1,84E+04	0,00598	0,00599	0,00658	0,91	0,00662	0,91	0,00646	0,93	0,00654	0,91
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,85</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,82</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,84</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>0,86</b>
							$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B2:** Dados de fator de atrito para goma xantana,  $n=0,907$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0219$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,1$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
367,00	887	8,53E+04	8,27E+04	8,34E+04	0,00345	0,00347	0,00416	0,83	0,00468	0,74	0,00435	0,79	0,00377	0,91
328,55	794	7,56E+04	7,33E+04	7,39E+04	0,00376	0,00379	0,00427	0,88	0,00481	0,79	0,00446	0,84	0,00392	0,96
303,32	733	6,93E+04	6,72E+04	6,77E+04	0,00377	0,00380	0,00436	0,87	0,00490	0,78	0,00455	0,83	0,00402	0,94
277,57	670	6,29E+04	6,10E+04	6,15E+04	0,00396	0,00399	0,00446	0,89	0,00500	0,80	0,00465	0,85	0,00415	0,96
255,17	616	5,74E+04	5,56E+04	5,61E+04	0,00398	0,00401	0,00457	0,87	0,00510	0,79	0,00474	0,84	0,00427	0,93
233,71	564	5,21E+04	5,05E+04	5,09E+04	0,00398	0,00401	0,00468	0,85	0,00521	0,77	0,00485	0,82	0,00440	0,91
204,27	493	4,50E+04	4,36E+04	4,40E+04	0,00421	0,00424	0,00486	0,87	0,00539	0,79	0,00502	0,84	0,00460	0,91
173,27	418	3,76E+04	3,64E+04	3,67E+04	0,00437	0,00441	0,0051	0,86	0,00562	0,78	0,00523	0,84	0,00487	0,90
144,01	348	3,07E+04	2,98E+04	3,00E+04	0,00486	0,00490	0,00538	0,90	0,00589	0,83	0,00549	0,88	0,00518	0,94
106,21	256	2,20E+04	2,14E+04	2,15E+04	0,00515	0,00519	0,0059	0,87	0,00637	0,82	0,00595	0,87	0,00575	0,90
32,59	78	6,06E+03	5,87E+03	5,92E+03	0,00714	0,00720	0,00875	0,82	0,00891	0,81	0,00841	0,85	0,00859	0,83
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,86</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,79</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,84</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>0,91</b>
							$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B3:** Dados de fator de atrito para goma xantana,  $n=0,786$ ,  $k(\text{dina}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2)=0,0590$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
369,08	892	7,49E+04	6,97E+04	7,12E+04	0,00325	0,00332	0,00366	0,89	0,00486	0,68	0,00403	0,81	0,00257	1,26
352,09	850	7,08E+04	6,58E+04	6,72E+04	0,00351	0,00358	0,00372	0,94	0,00492	0,73	0,00408	0,86	0,00263	1,33
312,47	755	6,12E+04	5,69E+04	5,81E+04	0,00351	0,00359	0,00386	0,91	0,00508	0,71	0,00422	0,83	0,00280	1,25
283,99	686	5,45E+04	5,07E+04	5,18E+04	0,00353	0,00360	0,00398	0,89	0,00521	0,69	0,00434	0,81	0,00294	1,20
255,78	618	4,80E+04	4,46E+04	4,56E+04	0,00364	0,00372	0,00412	0,88	0,00536	0,69	0,00447	0,81	0,00309	1,18
227,76	550	4,17E+04	3,88E+04	3,96E+04	0,00379	0,00387	0,00428	0,89	0,00554	0,70	0,00462	0,82	0,00328	1,15
198,43	479	3,53E+04	3,28E+04	3,35E+04	0,00403	0,00412	0,00448	0,90	0,00575	0,72	0,00482	0,84	0,00352	1,15
165,98	401	2,84E+04	2,64E+04	2,70E+04	0,00410	0,00418	0,00476	0,86	0,00605	0,69	0,00508	0,81	0,00385	1,07
120,79	291	1,93E+04	1,80E+04	1,83E+04	0,00438	0,00448	0,00533	0,82	0,00665	0,67	0,00561	0,78	0,00451	0,97
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,89</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,70</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,82</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,17</b>
							$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,11</b>

**Tabela B4:** Dados de fator de atrito para goma xantana,  $n=0,579$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,03185$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=25,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
377,56	913	6,13E+04	5,30E+04	5,57E+04	0,00255	0,00268	0,00278	0,92	0,00516	0,52	0,00336	0,76	0,00077	3,32
372,09	899	6,01E+04	5,19E+04	5,45E+04	0,00245	0,00257	0,00280	0,87	0,00518	0,50	0,00338	0,72	0,00078	3,14
336,84	814	5,22E+04	4,50E+04	4,74E+04	0,00269	0,00283	0,00292	0,92	0,00535	0,53	0,00351	0,77	0,00086	3,14
311,62	753	4,67E+04	4,03E+04	4,24E+04	0,00276	0,00290	0,00301	0,92	0,00549	0,53	0,00361	0,76	0,00092	2,98
283,62	685	4,09E+04	3,53E+04	3,71E+04	0,00281	0,00295	0,00314	0,89	0,00566	0,52	0,00373	0,75	0,00101	2,78
265,28	641	3,72E+04	3,21E+04	3,37E+04	0,00285	0,00300	0,00323	0,88	0,00578	0,52	0,00383	0,74	0,00108	2,65
226,67	548	2,97E+04	2,57E+04	2,70E+04	0,00317	0,00334	0,00346	0,92	0,00610	0,55	0,00406	0,78	0,00125	2,53
204,26	494	2,56E+04	2,21E+04	2,33E+04	0,00311	0,00327	0,00362	0,86	0,00632	0,52	0,00423	0,73	0,00138	2,24
169,57	410	1,97E+04	1,70E+04	1,79E+04	0,00334	0,00352	0,00394	0,85	0,00674	0,52	0,00455	0,73	0,00165	2,02
139,28	337	1,49E+04	1,28E+04	1,35E+04	0,00331	0,00348	0,00433	0,76	0,00724	0,48	0,00493	0,67	0,00200	1,66
100,21	242	9,32E+03	8,05E+03	8,46E+03	0,00478	0,00503	0,00510	0,94	0,00819	0,61	0,00567	0,84	0,00274	1,75
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,88</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,53</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,74</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>2,50</b>
							$\sigma$	<b>0,05</b>	$\sigma$	<b>0,04</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,50</b>

**Tabela B5:** Dados de fator de atrito para goma xantana,  $n=0,399$ ,  $k(\text{dina}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2)=1,849$   $T_m(^{\circ}\text{C})=24,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
376,90	911	3,73E+04	3,01E+04	3,29E+04	0,00194	0,00212	0,00220	0,88	0,00587	0,36	0,00290	0,67	0,00018	11,02
352,75	853	3,36E+04	2,71E+04	2,96E+04	0,00198	0,00216	0,00228	0,87	0,00602	0,36	0,00299	0,66	0,00020	10,08
332,79	804	3,06E+04	2,47E+04	2,69E+04	0,00200	0,00218	0,00236	0,85	0,00615	0,35	0,00307	0,65	0,00022	9,25
295,43	714	2,53E+04	2,04E+04	2,23E+04	0,00225	0,00246	0,00252	0,89	0,00645	0,38	0,00325	0,69	0,00026	8,55
258,04	624	2,04E+04	1,64E+04	1,79E+04	0,00232	0,00253	0,00273	0,85	0,00680	0,37	0,00347	0,67	0,00033	7,06
240,85	582	1,82E+04	1,47E+04	1,61E+04	0,00238	0,00260	0,00284	0,84	0,00699	0,37	0,00359	0,66	0,00037	6,46
221,95	536	1,60E+04	1,29E+04	1,41E+04	0,00246	0,00269	0,00298	0,83	0,00723	0,37	0,00374	0,66	0,00042	5,84
191,58	463	1,26E+04	1,02E+04	1,11E+04	0,00296	0,00323	0,00326	0,91	0,00769	0,42	0,00403	0,73	0,00054	5,52
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,86</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,37</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,68</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>7,97</b>
							$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>2,05</b>

**Tabela B6:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,921$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0227$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
355,24	859	7,18E+04	6,99E+04	7,04E+04	0,00422	0,00425	0,00439	0,96	0,00486	0,87	0,00456	0,93	0,00412	1,03
320,70	775	6,43E+04	6,26E+04	6,31E+04	0,00448	0,00451	0,00451	0,99	0,00497	0,91	0,00467	0,96	0,00425	1,05
302,04	730	6,03E+04	5,87E+04	5,91E+04	0,00449	0,00452	0,00459	0,98	0,00504	0,90	0,00474	0,95	0,00434	1,04
284,52	688	5,65E+04	5,50E+04	5,54E+04	0,00454	0,00457	0,00466	0,97	0,00512	0,89	0,00481	0,94	0,00442	1,03
254,72	616	5,02E+04	4,89E+04	4,92E+04	0,00462	0,00466	0,00480	0,96	0,00525	0,89	0,00494	0,94	0,00459	1,01
234,12	566	4,58E+04	4,46E+04	4,49E+04	0,00470	0,00474	0,00492	0,96	0,00536	0,88	0,00505	0,93	0,00471	1,00
210,05	508	4,07E+04	3,97E+04	4,00E+04	0,00489	0,00492	0,00507	0,96	0,00551	0,89	0,00518	0,94	0,00488	1,00
173,58	420	3,32E+04	3,23E+04	3,25E+04	0,00547	0,00551	0,00535	1,02	0,00577	0,95	0,00544	1,01	0,00519	1,05
138,41	335	2,60E+04	2,53E+04	2,55E+04	0,00551	0,00555	0,00572	0,96	0,00612	0,91	0,00577	0,96	0,00559	0,99
109,85	266	2,02E+04	1,97E+04	1,99E+04	0,00586	0,00590	0,00613	0,96	0,00650	0,91	0,00614	0,95	0,00603	0,97
83,90	203	1,51E+04	1,47E+04	1,48E+04	0,00647	0,00651	0,00667	0,97	0,00690	0,94	0,00661	0,98	0,00658	0,98
60,72	147	1,07E+04	1,04E+04	1,05E+04	0,00704	0,00709	0,00740	0,95	0,00765	0,93	0,00724	0,97	0,00731	0,96
33,70	81	5,66E+03	5,51E+03	5,55E+03	0,00879	0,00885	0,00907	0,97	0,00910	0,97	0,00865	1,02	0,00885	0,99
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,97</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,92</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,96</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,00</b>
							$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B7:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,895$ ,  $k(\text{dina}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2)=0,0314$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=31,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
367,62	889	6,45E+04	6,22E+04	6,28E+04	0,00407	0,00410	0,00437	0,93	0,00498	0,82	0,00458	0,89	0,00399	1,02
348,56	842	6,08E+04	5,87E+04	5,92E+04	0,00417	0,00421	0,00444	0,94	0,00504	0,84	0,00464	0,90	0,00406	1,03
316,45	765	5,46E+04	5,27E+04	5,32E+04	0,00443	0,00447	0,00456	0,97	0,00516	0,87	0,00475	0,93	0,00420	1,05
297,74	720	5,11E+04	4,93E+04	4,98E+04	0,00443	0,00448	0,00464	0,96	0,00524	0,85	0,00483	0,92	0,00430	1,03
276,35	668	4,70E+04	4,54E+04	4,58E+04	0,00459	0,00464	0,00474	0,97	0,00534	0,87	0,00492	0,93	0,00441	1,04
251,31	607	4,24E+04	4,09E+04	4,13E+04	0,00468	0,00473	0,00487	0,96	0,00547	0,86	0,00504	0,93	0,00456	1,03
218,74	529	3,63E+04	3,51E+04	3,54E+04	0,00503	0,00508	0,00507	0,99	0,00566	0,90	0,00522	0,96	0,00479	1,05
194,01	469	3,18E+04	3,07E+04	3,10E+04	0,00528	0,00533	0,00526	1,00	0,00584	0,91	0,00539	0,98	0,00500	1,06
164,88	399	2,66E+04	2,57E+04	2,59E+04	0,00544	0,00549	0,00552	0,99	0,0061	0,90	0,00563	0,97	0,00529	1,03
128,28	310	2,02E+04	1,95E+04	1,96E+04	0,00592	0,00598	0,00597	0,99	0,00652	0,92	0,00603	0,98	0,00579	1,02
64,14	155	9,37E+03	9,05E+03	9,13E+03	0,00733	0,00740	0,00751	0,98	0,00794	0,93	0,00738	0,99	0,00739	0,99
35,90	87	4,94E+03	4,76E+03	4,81E+03	0,00852	0,00860	0,00927	0,92	0,00949	0,91	0,00887	0,96	0,00908	0,94
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,97</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,89</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,95</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,02</b>
							$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B8:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,858$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0521$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=25,8$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
359,13	868	4,91E+04	4,68E+04	4,75E+04	0,00423	0,00428	0,00449	0,95	0,00530	0,80	0,00473	0,89	0,00394	1,07
345,88	836	4,71E+04	4,49E+04	4,55E+04	0,00435	0,00440	0,00454	0,97	0,00536	0,80	0,00477	0,91	0,00399	1,09
316,83	766	4,26E+04	4,06E+04	4,11E+04	0,00459	0,00465	0,00466	1,00	0,00548	0,81	0,00489	0,94	0,00414	1,11
301,00	727	4,02E+04	3,83E+04	3,88E+04	0,00462	0,00468	0,00473	0,99	0,00555	0,81	0,00495	0,93	0,00422	1,09
282,77	683	3,74E+04	3,56E+04	3,61E+04	0,00460	0,00466	0,00482	0,97	0,00564	0,81	0,00504	0,91	0,00433	1,06
258,57	625	3,38E+04	3,22E+04	3,26E+04	0,00474	0,00480	0,00496	0,97	0,00578	0,82	0,00516	0,92	0,00449	1,06
230,12	556	2,96E+04	2,82E+04	2,85E+04	0,00503	0,00509	0,00514	0,99	0,00596	0,82	0,00533	0,94	0,00470	1,07
208,21	503	2,64E+04	2,51E+04	2,55E+04	0,00517	0,00524	0,00531	0,99	0,00613	0,83	0,00549	0,94	0,00489	1,06
168,82	408	2,08E+04	1,98E+04	2,00E+04	0,00563	0,00571	0,00568	1,01	0,00649	0,84	0,00583	0,97	0,00532	1,06
123,08	297	1,45E+04	1,38E+04	1,40E+04	0,00614	0,00622	0,00632	0,98	0,00711	0,85	0,00640	0,96	0,00603	1,02
89,17	216	1,00E+04	9,55E+03	9,67E+03	0,00676	0,00685	0,00708	0,97	0,00782	0,86	0,00707	0,96	0,00686	0,98
60,35	146	6,41E+03	6,11E+03	6,19E+03	0,00757	0,00767	0,00832	0,92	0,00884	0,86	0,00802	0,94	0,00802	0,94
29,05	70	2,78E+03	2,65E+03	2,69E+03	0,00947	0,00959	0,01102	0,87	0,01131	0,86	0,01036	0,91	0,01073	0,88
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,97</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,83</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,96</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,03</b>
							$\sigma$	<b>0,04</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,07</b>

**Tabela B9:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,840$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0645$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
353,58	855	4,42E+04	4,19E+04	4,25E+04	0,00450	0,00456	0,00451	1,00	0,00544	0,84	0,00478	0,94	0,00387	1,16
337,58	816	4,19E+04	3,97E+04	4,03E+04	0,00452	0,00459	0,00458	0,99	0,00551	0,83	0,00484	0,93	0,00395	1,15
310,37	750	3,80E+04	3,60E+04	3,65E+04	0,00465	0,00472	0,00470	0,99	0,00563	0,84	0,00495	0,94	0,00409	1,14
286,42	692	3,46E+04	3,28E+04	3,33E+04	0,00479	0,00486	0,00482	0,99	0,00575	0,85	0,00506	0,95	0,00423	1,13
258,72	625	3,08E+04	2,92E+04	2,96E+04	0,00499	0,00506	0,00498	1,00	0,00591	0,86	0,00521	0,96	0,00442	1,13
230,32	557	2,69E+04	2,55E+04	2,59E+04	0,00526	0,00534	0,00502	1,05	0,00617	0,87	0,00539	0,98	0,00464	1,13
203,36	492	2,33E+04	2,20E+04	2,24E+04	0,00542	0,00550	0,00539	1,00	0,00632	0,87	0,00559	0,97	0,00489	1,11
165,48	400	1,83E+04	1,74E+04	1,76E+04	0,00602	0,00611	0,00577	1,04	0,00671	0,91	0,00594	1,01	0,00534	1,13
131,97	319	1,41E+04	1,34E+04	1,36E+04	0,00631	0,00640	0,00625	1,01	0,00717	0,89	0,00636	0,99	0,00587	1,07
95,14	230	9,64E+03	9,14E+03	9,27E+03	0,00688	0,00699	0,00703	0,98	0,00792	0,88	0,00706	0,98	0,00674	1,02
63,82	154	6,07E+03	5,75E+03	5,84E+03	0,00779	0,00791	0,00819	0,95	0,00899	0,88	0,00806	0,97	0,00798	0,98
33,03	80	2,83E+03	2,68E+03	2,72E+03	0,00952	0,00966	0,01078	0,88	0,01128	0,86	0,01021	0,93	0,01055	0,90
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,99</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,89</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,96</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,08</b>
							$\sigma$	<b>0,04</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,08</b>

**Tabela B10:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,832$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0869$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,7$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
350,34	847	3,42E+04	3,24E+04	3,29E+04	0,00458	0,00465	0,00479	0,96	0,00577	0,81	0,00505	0,91	0,00415	1,10
335,44	811	3,25E+04	3,08E+04	3,12E+04	0,00469	0,00477	0,00485	0,97	0,00584	0,82	0,00511	0,92	0,00423	1,11
314,72	761	3,02E+04	2,85E+04	2,90E+04	0,00474	0,00481	0,00496	0,95	0,00594	0,81	0,00520	0,91	0,00435	1,09
290,03	701	2,75E+04	2,60E+04	2,64E+04	0,00512	0,00521	0,00509	1,01	0,00608	0,86	0,00533	0,96	0,00451	1,14
269,16	651	2,52E+04	2,38E+04	2,42E+04	0,00519	0,00527	0,00522	0,99	0,00621	0,85	0,00544	0,95	0,00465	1,12
249,10	602	2,30E+04	2,17E+04	2,21E+04	0,00524	0,00533	0,00535	0,98	0,00635	0,84	0,00557	0,94	0,00481	1,09
225,47	545	2,05E+04	1,93E+04	1,97E+04	0,00557	0,00566	0,00554	1,01	0,00653	0,87	0,00574	0,97	0,00503	1,11
193,66	468	1,71E+04	1,62E+04	1,65E+04	0,00597	0,00607	0,00584	1,02	0,00682	0,89	0,00601	0,99	0,00537	1,11
156,28	378	1,33E+04	1,26E+04	1,28E+04	0,00640	0,00650	0,0063	1,02	0,00727	0,89	0,00642	1,00	0,00589	1,09
118,96	288	9,70E+03	9,17E+03	9,31E+03	0,00680	0,00691	0,00696	0,98	0,00791	0,87	0,00701	0,97	0,00663	1,03
85,09	206	6,56E+03	6,20E+03	6,30E+03	0,00728	0,00740	0,00791	0,92	0,0088	0,84	0,00784	0,93	0,00767	0,95
52,07	126	3,70E+03	3,49E+03	3,55E+03	0,00832	0,00846	0,00968	0,86	0,0104	0,81	0,00932	0,89	0,00949	0,88
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,97</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,85</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,95</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,07</b>
							$\sigma$	<b>0,05</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,08</b>

**Tabela B11:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,817$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1109$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=29,7$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
344,34	832	2,92E+04	2,74E+04	2,79E+04	0,00488	0,00497	0,00491	0,99	0,00600	0,83	0,00518	0,94	0,00422	1,16
327,10	791	2,75E+04	2,58E+04	2,63E+04	0,00490	0,00498	0,00500	0,98	0,00609	0,82	0,00526	0,93	0,00432	1,13
300,95	727	2,49E+04	2,34E+04	2,38E+04	0,00504	0,00513	0,00514	0,98	0,00623	0,82	0,00540	0,93	0,00448	1,12
270,84	655	2,20E+04	2,07E+04	2,10E+04	0,00530	0,00539	0,00533	0,99	0,00643	0,84	0,00557	0,95	0,00470	1,13
248,96	602	1,99E+04	1,87E+04	1,90E+04	0,00545	0,00555	0,00549	0,99	0,00658	0,84	0,00571	0,96	0,00489	1,12
221,85	536	1,74E+04	1,63E+04	1,66E+04	0,00584	0,00594	0,00572	1,02	0,00681	0,87	0,00592	0,99	0,00515	1,13
201,76	488	1,55E+04	1,46E+04	1,48E+04	0,00602	0,00613	0,00591	1,02	0,00701	0,87	0,00610	0,99	0,00538	1,12
171,23	414	1,28E+04	1,20E+04	1,22E+04	0,00649	0,00660	0,00627	1,03	0,00737	0,90	0,00643	1,01	0,00579	1,12
135,71	328	9,70E+03	9,12E+03	9,28E+03	0,00711	0,00724	0,00685	1,04	0,00792	0,91	0,00693	1,03	0,00644	1,10
98,18	237	6,62E+03	6,22E+03	6,33E+03	0,00725	0,00738	0,00777	0,93	0,00879	0,84	0,00774	0,94	0,00746	0,97
70,44	170	4,47E+03	4,20E+03	4,28E+03	0,00849	0,00864	0,00891	0,95	0,00984	0,88	0,00871	0,97	0,00868	0,98
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,99</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,86</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,97</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>1,10</b>
							$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,06</b>

**Tabela B12:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,830$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1965$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=30,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
334,25	808	1,46E+04	1,38E+04	1,40E+04	0,00537	0,00546	0,00611	0,88	0,00711	0,77	0,006260	0,86	0,005671	0,95
296,34	716	1,27E+04	1,20E+04	1,22E+04	0,00602	0,00611	0,00638	0,94	0,00737	0,83	0,006500	0,93	0,005977	1,01
278,60	673	1,18E+04	1,11E+04	1,13E+04	0,00615	0,00625	0,00653	0,94	0,00751	0,83	0,006630	0,93	0,006140	1,00
266,03	643	1,12E+04	1,05E+04	1,07E+04	0,00603	0,00613	0,00664	0,91	0,00762	0,80	0,006730	0,90	0,006266	0,96
242,07	585	1,00E+04	9,44E+03	9,59E+03	0,00599	0,00608	0,00687	0,87	0,00785	0,77	0,006940	0,86	0,006529	0,92
213,80	517	8,65E+03	8,16E+03	8,30E+03	0,00647	0,00658	0,00720	0,90	0,00791	0,83	0,007230	0,90	0,006893	0,94
189,80	459	7,52E+03	7,10E+03	7,22E+03	0,00657	0,00668	0,00754	0,87	0,00848	0,79	0,007520	0,87	0,007261	0,90
161,82	391	6,24E+03	5,89E+03	5,99E+03	0,00710	0,00722	0,00803	0,88	0,00893	0,81	0,007940	0,89	0,007785	0,91
129,92	314	4,83E+03	4,56E+03	4,63E+03	0,00751	0,00763	0,00878	0,86	0,00961	0,79	0,008570	0,88	0,008569	0,88
101,35	245	3,61E+03	3,41E+03	3,46E+03	0,00799	0,00812	0,00974	0,82	0,01067	0,76	0,009380	0,85	0,009550	0,84
68,96	167	2,30E+03	2,17E+03	2,21E+03	0,00890	0,00905	0,01156	0,77	0,01205	0,75	0,010860	0,82	0,011300	0,79
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,88</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,79</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,88</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>0,92</b>
							$\sigma$	<b>0,05</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>	$\sigma$	<b>0,07</b>

**Tabela B13:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,825$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,2404$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
319,90	773	1,18E+04	1,11E+04	1,13E+04	0,00576	0,00586	0,00650	0,89	0,00741	0,79	0,00661	0,87	0,00608	0,95
298,65	722	1,09E+04	1,02E+04	1,04E+04	0,00605	0,00615	0,00666	0,91	0,00768	0,80	0,00676	0,89	0,00627	0,96
280,50	678	1,01E+04	9,52E+03	9,68E+03	0,00638	0,00648	0,00682	0,94	0,00783	0,83	0,00690	0,92	0,00645	0,99
264,30	639	9,42E+03	8,88E+03	9,02E+03	0,00652	0,00663	0,00697	0,94	0,00798	0,83	0,00703	0,93	0,00662	0,99
249,81	604	8,81E+03	8,31E+03	8,45E+03	0,00650	0,00661	0,00713	0,91	0,00812	0,81	0,00717	0,91	0,00679	0,96
223,23	540	7,72E+03	7,28E+03	7,40E+03	0,00696	0,00708	0,00744	0,94	0,00842	0,84	0,00744	0,94	0,00714	0,98
193,53	468	6,53E+03	6,16E+03	6,26E+03	0,00726	0,00738	0,00787	0,92	0,00882	0,84	0,00781	0,93	0,00760	0,95
161,49	390	5,28E+03	4,98E+03	5,06E+03	0,00786	0,00799	0,00847	0,93	0,00937	0,85	0,00832	0,94	0,00824	0,95
131,05	317	4,13E+03	3,90E+03	3,96E+03	0,00803	0,00817	0,00924	0,87	0,01006	0,81	0,00897	0,90	0,00903	0,89
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,91</b>	$f_{exp}/f_{To}$	<b>0,82</b>	$F_{exp}/f_{DM}$	<b>0,91</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>0,96</b>
							$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B14:** Dados de fator de atrito para CMC,  $n=0,816$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,3160$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,8$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\dot{\gamma}^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{Cl}$	$Re_{To}$	$Re_{MD}$	$f_{exp}$	$f_{exp-To}$	$f_{Cl}$	$f_{exp}/f_{Cl}$	$f_{To}$	$f_{exp}/f_{To}$	$f_{DM}$	$f_{exp}/f_{DM}$	$f_{SM}$	$f_{exp}/f_{SM}$
312,99	756	9,32E+03	8,76E+03	8,91E+03	0,00627	0,00639	0,00693	0,91	0,00796	0,80	0,00701	0,89	0,00653	0,96
298,22	721	8,80E+03	8,27E+03	8,42E+03	0,00644	0,00655	0,00706	0,91	0,00808	0,81	0,00712	0,90	0,00667	0,97
279,90	676	8,16E+03	7,67E+03	7,81E+03	0,00678	0,00690	0,00723	0,94	0,00825	0,84	0,00727	0,93	0,00687	0,99
264,21	639	7,63E+03	7,17E+03	7,29E+03	0,00689	0,00701	0,0074	0,93	0,00841	0,83	0,00742	0,93	0,00705	0,98
246,91	597	7,04E+03	6,61E+03	6,73E+03	0,00706	0,00719	0,0076	0,93	0,00859	0,84	0,00759	0,93	0,00727	0,97
226,30	547	6,35E+03	5,97E+03	6,07E+03	0,00727	0,00739	0,00787	0,92	0,00884	0,84	0,00783	0,93	0,00757	0,96
199,77	483	5,48E+03	5,15E+03	5,24E+03	0,00775	0,00789	0,00828	0,94	0,00922	0,86	0,00818	0,95	0,00801	0,97
168,09	406	4,46E+03	4,20E+03	4,27E+03	0,00814	0,00828	0,0089	0,91	0,00979	0,85	0,00870	0,94	0,00867	0,94
133,64	323	3,40E+03	3,20E+03	3,25E+03	0,00866	0,00882	0,00983	0,88	0,01061	0,83	0,00948	0,91	0,00962	0,90
							$f_{exp}/f_{Cl}$	<b>0,92</b>	$F_{exp}/f_{To}$	<b>0,83</b>	$f_{exp}/f_{DM}$	<b>0,92</b>	$f_{exp}/f_{SM}$	<b>0,96</b>
							$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,02</b>	$\sigma$	<b>0,03</b>

**Tabela B15:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana,  $n=0,979$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0144$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,8$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MD</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
329,16	795	6,99E+04	598,85	55,22	10,84
308,19	744	6,54E+04	537,54	48,41	11,10
283,31	685	6,00E+04	449,26	40,91	10,98
247,54	598	5,23E+04	349,83	31,23	11,20
211,00	510	4,44E+04	245,00	22,69	10,80
177,14	428	3,72E+04	175,46	15,99	10,97
145,91	353	3,05E+04	118,87	10,85	10,95
111,37	269	2,31E+04	67,08	6,32	10,61
80,72	195	1,67E+04	36,87	3,32	11,10
44,73	108	9,12E+03	11,07	1,02	10,85
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,94</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,17</b>

**Tabela B16:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana,  $n=0,906$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0215$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
331,16	800	7,63E+04	591,44	55,90	10,58
295,17	713	6,73E+04	494,87	44,41	11,14
269,96	652	6,10E+04	415,04	37,15	11,17
255,67	618	5,75E+04	357,21	33,32	10,72
224,64	543	4,99E+04	290,20	25,72	11,28
198,81	481	4,37E+04	225,98	20,15	11,22
167,00	404	3,61E+04	155,86	14,21	10,97
131,85	319	2,79E+04	98,07	8,86	11,07
99,94	242	2,06E+04	56,94	5,09	11,18
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>11,04</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,24</b>

**Tabela B17:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana,  $n=0,799$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0520$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
333,51	806	6,44E+04	587,02	56,69	10,35
309,59	748	5,89E+04	519,27	48,85	10,63
275,04	665	5,11E+04	409,09	38,56	10,61
247,47	598	4,50E+04	340,12	31,21	10,90
216,79	524	3,84E+04	252,57	23,95	10,54
179,97	435	3,07E+04	170,30	16,51	10,32
141,19	341	2,30E+04	106,42	10,16	10,47
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,55</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,20</b>

**Tabela B18:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana,  $n=0,579$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,3185$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,1$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
344,55	833	4,89E+04	638,94	60,51	10,56
323,66	782	4,47E+04	568,65	53,39	10,65
279,91	677	3,64E+04	430,54	39,93	10,78
254,43	615	3,18E+04	350,45	33,00	10,62
219,28	530	2,57E+04	265,99	24,51	10,85
193,95	469	2,16E+04	200,55	19,17	10,46
124,48	301	1,15E+04	82,82	7,90	10,49
83,30	201	6,50E+03	37,51	3,54	10,61
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,63</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,14</b>

**Tabela B19:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-goma xantana,  $n=0,397$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=1,868$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,1$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
339,96	822	2,80E+04	654,83	58,90	11,12
315,97	764	2,49E+04	581,88	50,88	11,44
289,91	701	2,17E+04	476,63	42,84	11,13
260,38	629	1,83E+04	387,73	34,55	11,22
241,17	583	1,62E+04	345,40	29,64	11,65
208,10	503	1,28E+04	261,53	22,07	11,85
176,90	428	9,84E+03	192,36	15,95	12,06
101,73	246	4,05E+03	61,65	5,27	11,69
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>11,52</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,35</b>

**Tabela B20:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,933$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0206$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
326,20	788	6,54E+04	575,45	54,23	10,61
306,56	741	6,12E+04	503,43	47,90	10,51
276,89	669	5,49E+04	437,96	39,08	11,21
257,49	622	5,08E+04	363,00	33,79	10,74
229,64	555	4,50E+04	291,62	26,88	10,85
203,58	492	3,96E+04	227,22	21,12	10,76
183,76	444	3,55E+04	189,45	17,21	11,01
160,46	388	3,07E+04	140,56	13,12	10,71
130,86	316	2,47E+04	95,81	8,73	10,98
104,35	252	1,94E+04	62,93	5,55	11,34
75,13	182	1,37E+04	32,36	2,88	11,25
55,46	134	9,88E+03	17,49	1,57	11,16
30,31	73	5,18E+03	5,45	0,47	11,64
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,93</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,27</b>

**Tabela B21:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,895$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0314$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=31,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
321,53	777	5,42E+04	545,31	52,69	10,35
300,17	725	5,02E+04	462,13	45,92	10,06
273,75	662	4,54E+04	402,26	38,20	10,53
253,25	612	4,16E+04	339,96	32,69	10,40
236,06	571	3,85E+04	293,39	28,40	10,33
212,59	514	3,43E+04	242,50	23,03	10,53
177,77	430	2,82E+04	171,35	16,11	10,64
145,28	351	2,25E+04	108,21	10,76	10,06
81,88	198	1,20E+04	34,39	3,42	10,07
54,53	132	7,63E+03	16,14	1,52	10,65
28,17	68	3,68E+03	4,44	0,40	10,97
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,42</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,29</b>

**Tabela B22:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,858$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0521$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
331,51	801	4,33E+04	565,07	56,01	10,09
309,56	748	4,01E+04	501,06	48,84	10,26
260,03	628	3,28E+04	348,18	34,46	10,10
230,66	557	2,86E+04	280,85	27,12	10,36
202,29	489	2,46E+04	206,74	20,86	9,91
161,52	390	1,91E+04	134,98	13,30	10,15
125,57	303	1,43E+04	83,38	8,04	10,38
84,90	205	9,15E+03	36,51	3,67	9,94
49,63	120	4,95E+03	13,63	1,26	10,86
28,66	69	2,65E+03	4,68	0,42	11,18
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>10,32</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,40</b>

**Tabela B23:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,840$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0645$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v^2/2g$ (cm)	$K$
330,83	800	3,92E+04	553,63	55,78	9,92
310,93	751	3,64E+04	501,97	49,27	10,19
284,33	687	3,29E+04	412,30	41,20	10,01
264,82	640	3,03E+04	369,03	35,74	10,32
252,24	610	2,86E+04	328,27	32,43	10,12
225,36	545	2,51E+04	261,91	25,89	10,12
188,42	455	2,04E+04	186,52	18,09	10,31
157,27	380	1,65E+04	131,22	12,61	10,41
122,92	297	1,24E+04	78,29	7,70	10,17
90,48	219	8,71E+03	44,70	4,17	10,71
59,66	144	5,37E+03	19,64	1,81	10,82
36,60	88	3,05E+03	7,24	0,68	10,60
				<b><math>K_m</math></b>	<b>10,31</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,28</b>

**Tabela B24:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,832$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0869$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=29,1$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v^2/2g$ (cm)	$K$
320,97	776	2,97E+04	544,47	52,51	10,37
307,39	743	2,82E+04	496,77	48,16	10,32
290,75	703	2,64E+04	449,57	43,09	10,43
275,92	667	2,49E+04	389,34	38,80	10,03
249,05	602	2,21E+04	329,81	31,61	10,43
224,62	543	1,96E+04	270,84	25,72	10,53
192,46	465	1,63E+04	198,86	18,88	10,53
158,86	384	1,31E+04	132,84	12,86	10,33
121,27	293	9,53E+03	80,50	7,50	10,74
86,42	209	6,41E+03	40,98	3,81	10,77
				<b><math>K_m</math></b>	<b>10,45</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,21</b>

**Tabela B25:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,817$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1109$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=29,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v^2/2g$ (cm)	$K$
299,51	724	2,37E+04	474,51	45,72	10,38
281,08	679	2,20E+04	412,57	40,27	10,25
262,53	635	2,03E+04	359,32	35,13	10,23
239,72	579	1,82E+04	297,83	29,29	10,17
215,88	522	1,61E+04	240,04	23,75	10,11
190,08	459	1,38E+04	184,78	18,41	10,03
160,41	388	1,13E+04	138,50	13,11	10,56
127,02	307	8,58E+03	84,62	8,22	10,29
94,99	230	6,09E+03	47,60	4,60	10,35
60,09	145	3,54E+03	18,71	1,84	10,16
				<b><math>K_m</math></b>	<b>10,25</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,15</b>

**Tabela B26:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,830$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1965$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=30,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v^2/2g$ (cm)	$K$
307,65	744	1,27E+04	507,14	48,24	10,51
295,44	714	1,21E+04	439,25	44,49	9,87
272,64	659	1,10E+04	378,48	37,89	9,99
250,46	605	9,98E+03	314,83	31,97	9,85
224,95	544	8,81E+03	260,34	25,79	10,09
191,16	462	7,28E+03	196,79	18,63	10,57
159,58	386	5,89E+03	139,86	12,98	10,78
130,80	316	4,67E+03	92,08	8,72	10,56
101,09	244	3,45E+03	56,48	5,21	10,84
64,81	157	2,05E+03	23,33	2,14	10,90
				<b><math>K_m</math></b>	<b>10,40</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,43</b>

**Tabela B27:** Dados de coeficiente de perda para válvula globo-CMC,  $n=0,825$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,2404$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,8$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
300,43	726	1,05E+04	500,68	46,00	10,88
285,26	689	9,87E+03	461,68	41,47	11,13
263,80	638	9,00E+03	385,27	35,47	10,86
222,06	537	7,36E+03	277,62	25,13	11,05
192,64	466	6,23E+03	210,59	18,91	11,13
163,84	396	5,15E+03	152,94	13,68	11,18
133,36	322	4,04E+03	104,99	9,06	11,58
98,09	237	2,82E+03	54,48	4,90	11,11
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>11,15</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,22</b>

**Tabela B28:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°- goma xantana,  $n=0,965$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0144$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
355,27	859	8,31E+04	89,55	64,33	1,39
319,91	773	7,45E+04	75,53	52,16	1,45
298,18	721	6,93E+04	67,74	45,32	1,50
267,48	646	6,19E+04	52,34	36,47	1,44
244,56	591	5,65E+04	46,79	30,48	1,53
222,53	538	5,12E+04	35,93	25,24	1,42
192,57	465	4,41E+04	27,04	18,90	1,43
166,66	403	3,80E+04	19,87	14,16	1,40
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,45</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,05</b>

**Tabela B29:** Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°-goma xantana,  $n=0,907$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0219$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
367,18	887	8,34E+04	90,62	68,72	1,32
328,55	794	7,39E+04	79,45	55,02	1,44
303,32	733	6,77E+04	65,83	46,89	1,40
277,57	670	6,15E+04	55,81	39,27	1,42
255,17	616	5,61E+04	46,37	33,19	1,40
233,71	564	5,09E+04	37,88	27,84	1,36
204,27	493	4,40E+04	28,92	21,27	1,36
173,27	419	3,67E+04	20,45	15,30	1,34
144,01	348	3,00E+04	14,74	10,57	1,39
106,21	257	2,15E+04	8,18	5,75	1,42
32,59	78	5,92E+03	0,73	0,54	1,35
				$K_m$	<b>1,38</b>
				$\sigma$	<b>0,04</b>

**Tabela B30:** Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°-goma xantana,  $n=0,786$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0590$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,7$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
369,08	892	7,12E+04	92,10	69,43	1,33
352,09	851	6,72E+04	82,14	63,19	1,30
312,47	755	5,81E+04	70,23	49,76	1,41
283,99	686	5,18E+04	57,75	41,11	1,40
255,78	618	4,56E+04	46,25	33,34	1,39
227,76	550	3,96E+04	36,99	26,44	1,40
198,43	480	3,35E+04	27,63	20,07	1,38
165,98	401	2,70E+04	20,76	14,04	1,48
120,79	292	1,83E+04	9,56	7,44	1,29
84,82	205	1,19E+04	4,77	3,67	1,30
				$K_m$	<b>1,37</b>
				$\sigma$	<b>0,06</b>

**Tabela B31:** Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°-goma xantana,  $n=0,579$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,3185$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=25,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
377,56	913	5,57E+04	108,73	72,66	1,50
336,84	814	4,74E+04	79,09	57,83	1,37
311,62	753	4,24E+04	71,46	49,49	1,44
283,62	685	3,71E+04	58,99	41,00	1,44
265,28	641	3,37E+04	50,58	35,87	1,41
226,67	548	2,70E+04	38,71	26,19	1,48
204,26	494	2,33E+04	30,40	21,26	1,43
169,57	410	1,79E+04	21,56	14,66	1,47
100,21	242	8,46E+03	7,29	5,12	1,42
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,44</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,04</b>

**Tabela B32:** Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°-goma xantana,  $n=0,399$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=1,849$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=24,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
376,90	911	3,29E+04	103,82	72,40	1,434
352,75	853	2,96E+04	98,24	63,42	1,549
332,79	804	2,69E+04	82,32	56,45	1,458
313,42	758	2,45E+04	73,79	50,07	1,474
295,48	714	2,23E+04	61,39	44,50	1,380
258,04	624	1,79E+04	51,53	33,94	1,518
240,85	582	1,61E+04	45,19	29,57	1,528
221,95	536	1,41E+04	37,68	25,11	1,501
191,58	463	1,11E+04	28,32	18,71	1,514
151,80	367	7,67E+03	19,34	11,75	1,646
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,50</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,07</b>

**Tabela B33:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,921,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0227$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
355,24	859	7,04E+04	89,99	64,32	1,40
320,70	775	6,31E+04	75,12	52,42	1,43
302,04	730	5,91E+04	67,12	46,50	1,44
284,52	688	5,54E+04	55,01	41,26	1,33
254,72	616	4,92E+04	45,97	33,07	1,39
234,12	566	4,49E+04	37,75	27,94	1,35
210,05	508	4,00E+04	31,07	22,49	1,38
173,58	420	3,25E+04	20,60	15,36	1,34
138,41	335	2,55E+04	14,11	9,76	1,45
109,85	266	1,99E+04	8,76	6,15	1,42
83,90	203	1,48E+04	5,22	3,59	1,45
60,72	147	1,05E+04	2,72	1,88	1,45
33,70	81	5,55E+03	0,86	0,58	1,48
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,41</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,05</b>

**Tabela B34:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,895,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0314$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=31,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
367,62	889	6,28E+04	88,40	68,88	1,28
348,56	842	5,92E+04	84,49	61,92	1,36
316,45	765	5,32E+04	73,97	51,04	1,45
297,74	720	4,98E+04	64,61	45,18	1,43
276,35	668	4,58E+04	55,54	38,92	1,43
251,31	607	4,13E+04	46,84	32,19	1,45
218,74	529	3,54E+04	36,40	24,39	1,49
194,01	469	3,10E+04	28,32	19,19	1,48
164,88	399	2,59E+04	20,40	13,86	1,47
128,28	310	1,96E+04	12,36	8,39	1,47
64,14	155	9,13E+03	2,99	2,10	1,43
35,90	87	4,81E+03	1,00	0,66	1,52
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,44</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,06</b>

**Tabela B35:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC,  $n=0,858$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0521$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
359,13	868	4,75E+04	86,35	65,74	1,31
345,88	836	4,55E+04	81,35	60,98	1,33
316,83	766	4,11E+04	71,63	51,16	1,40
301,00	727	3,88E+04	63,10	46,18	1,37
282,77	683	3,61E+04	56,13	40,75	1,38
258,57	625	3,26E+04	44,94	34,08	1,32
230,12	556	2,85E+04	36,65	26,99	1,36
168,82	408	2,00E+04	19,55	14,53	1,35
123,08	297	1,40E+04	10,69	7,72	1,38
89,17	216	9,67E+03	5,83	4,05	1,44
60,35	146	6,19E+03	2,56	1,86	1,38
29,05	70	2,69E+03	0,62	0,43	1,44
				$K_m$	<b>1,37</b>
				$\sigma$	<b>0,04</b>

**Tabela B36:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC,  $n=0,840$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0645$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
353,58	855	4,25E+04	84,57	63,72	1,33
337,58	816	4,03E+04	77,66	58,08	1,34
310,37	750	3,65E+04	66,44	49,10	1,35
286,42	692	3,33E+04	58,14	41,81	1,39
258,72	625	2,96E+04	48,97	34,12	1,44
230,32	557	2,59E+04	40,84	27,04	1,51
203,36	492	2,24E+04	30,89	21,08	1,47
131,97	319	1,36E+04	13,16	8,88	1,48
95,14	230	9,27E+03	6,40	4,61	1,39
63,82	154	5,84E+03	3,01	2,08	1,45
33,03	80	2,72E+03	0,85	0,56	1,52
				$K_m$	<b>1,42</b>
				$\sigma$	<b>0,07</b>

**Tabela B37:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,832,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0869$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
350,34	847	3,29E+04	82,60	62,56	1,32
335,44	811	3,12E+04	75,63	57,35	1,32
314,72	761	2,90E+04	67,21	50,48	1,33
290,03	701	2,64E+04	59,36	42,87	1,38
269,16	651	2,42E+04	51,83	36,92	1,40
249,10	602	2,21E+04	45,23	31,63	1,43
225,47	545	1,97E+04	36,50	25,91	1,41
193,66	468	1,65E+04	28,69	19,12	1,50
156,28	378	1,28E+04	18,57	12,45	1,49
118,96	288	9,31E+03	10,98	7,21	1,52
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,41</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,08</b>

**Tabela B38:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,817,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1109$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=29,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
344,34	832	2,79E+04	82,49	60,43	1,37
327,10	791	2,63E+04	72,28	54,53	1,33
300,95	727	2,38E+04	61,21	46,16	1,33
270,84	655	2,10E+04	50,57	37,39	1,35
248,96	602	1,90E+04	44,40	31,59	1,41
221,85	536	1,66E+04	36,35	25,08	1,45
201,76	488	1,48E+04	30,68	20,75	1,48
171,23	414	1,22E+04	21,22	14,94	1,42
135,71	328	9,28E+03	14,37	9,39	1,53
98,18	237	6,33E+03	7,15	4,91	1,45
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,41</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,07</b>

**Tabela B39:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,830,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1965$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=30,0$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
296,34	716	1,22E+04	67,59	44,76	1,51
278,60	673	1,13E+04	61,21	39,56	1,55
266,03	643	1,07E+04	52,41	36,07	1,45
242,07	585	9,59E+03	40,64	29,87	1,36
213,80	517	8,30E+03	33,12	23,30	1,42
189,80	459	7,22E+03	27,02	18,36	1,47
161,82	391	5,99E+03	18,66	13,35	1,40
129,92	314	4,63E+03	12,63	8,60	1,47
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,45</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,06</b>

**Tabela B40:** Dados de coeficiente de perda para joelho 90°-CMC, n=0,825,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,2404$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,5$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

<b>v</b> <b>(cm/s)</b>	<b><math>\gamma^*</math></b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Re<sub>MR</sub></b>	<b>h<sub>s</sub></b> <b>(cm)</b>	<b>v<sub>2</sub><sup>2</sup>/2g</b> <b>(cm)</b>	<b>K</b>
319,90	773	1,13E+04	72,65	52,16	1,39
298,65	722	1,04E+04	66,31	45,46	1,46
280,50	678	9,68E+03	61,59	40,10	1,54
264,30	639	9,02E+03	52,56	35,60	1,48
249,81	604	8,45E+03	46,79	31,81	1,47
223,23	540	7,40E+03	36,97	25,40	1,46
193,53	468	6,26E+03	27,32	19,09	1,43
161,49	390	5,06E+03	20,00	13,29	1,50
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>1,47</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,04</b>

**Tabela B41:** Dados de coeficiente de perda para Joelho 90°-CMC,  $n=0,816$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,3160$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,5$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
312,99	756	8,91E+03	68,62	49,93	1,37
298,22	721	8,42E+03	64,86	45,33	1,43
279,90	676	7,81E+03	56,85	39,93	1,42
264,21	639	7,29E+03	51,79	35,58	1,46
246,91	597	6,73E+03	45,70	31,07	1,47
226,30	547	6,07E+03	37,63	26,10	1,44
199,77	483	5,24E+03	30,45	20,34	1,50
168,09	406	4,27E+03	21,23	14,40	1,47
133,64	323	3,25E+03	13,01	9,10	1,43
				$K_m$	<b>1,44</b>
				$\sigma$	<b>0,04</b>

**Tabela B42:** Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana,  $n=0,965$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0144$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
355,27	858	8,31E+04	91,05	177,70	0,51
319,91	773	7,46E+04	77,12	144,09	0,54
298,18	720	6,93E+04	68,70	125,18	0,55
267,48	646	6,20E+04	49,87	100,73	0,50
244,56	591	5,65E+04	40,65	84,20	0,48
222,53	538	5,12E+04	31,99	69,72	0,46
192,57	465	4,41E+04	22,97	52,21	0,44
166,66	403	3,80E+04	17,04	39,10	0,44
				$K_m$	0,49
				$\sigma$	0,04

**Tabela B43:** Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana,  $n=0,907$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0219$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
367,183	887	8,34E+04	79,49	189,82	0,42
328,552	794	7,39E+04	81,38	151,98	0,54
303,318	733	6,77E+04	62,30	129,53	0,48
255,166	617	5,61E+04	43,91	91,67	0,48
233,711	565	5,09E+04	36,39	76,90	0,47
204,274	494	4,40E+04	28,78	58,75	0,49
173,273	419	3,67E+04	18,51	42,27	0,44
144,008	348	3,00E+04	13,69	29,20	0,47
106,213	256	2,15E+04	6,86	15,88	0,43
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,47</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,03</b>

**Tabela B44:** Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana,  $n=0,786$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0590$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=26,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
369,08	892	7,12E+04	93,29	191,78	0,49
352,09	851	6,72E+04	74,29	174,54	0,43
312,47	755	5,81E+04	75,12	137,46	0,55
283,99	686	5,18E+04	56,53	113,55	0,50
255,78	618	4,56E+04	43,32	92,11	0,47
227,76	550	3,96E+04	38,06	73,03	0,52
165,98	401	2,70E+04	17,19	38,79	0,44
120,79	292	1,83E+04	7,60	20,54	0,37
84,82	205	1,19E+04	3,50	10,13	0,35
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,45</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,07</b>

**Tabela B45:** Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana,  $n=0,579$ ,  $k(\text{dina}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2)=0,3185$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=25,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
377,56	913	5,57E+04	108,78	200,70	0,54
336,84	814	4,74E+04	90,05	159,74	0,56
311,62	753	4,24E+04	81,72	136,72	0,60
283,62	685	3,71E+04	65,20	113,25	0,58
265,28	641	3,37E+04	54,72	99,08	0,55
226,67	548	2,70E+04	38,93	72,33	0,54
204,26	494	2,33E+04	33,27	58,74	0,57
169,57	410	1,79E+04	23,19	40,48	0,57
139,28	337	1,35E+04	15,16	27,31	0,55
				<b><math>K_m</math></b>	<b>0,57</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,02</b>

**Tabela B46:** Dados de coeficiente de perda para redução-goma xantana,  $n=0,399$ ,  $k(\text{dina}\cdot\text{s}^n/\text{cm}^2)=1,8483$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=24,5$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
376,90	911	3,29E+04	88,43	200,00	0,44
352,75	853	2,96E+04	87,69	175,19	0,50
332,79	804	2,69E+04	72,79	155,93	0,47
313,42	758	2,45E+04	60,43	138,30	0,44
295,48	714	2,23E+04	47,63	122,92	0,39
258,04	624	1,79E+04	39,71	93,74	0,42
240,85	582	1,61E+04	31,99	81,67	0,39
221,95	536	1,41E+04	27,05	69,35	0,39
				<b><math>K_m</math></b>	<b>0,43</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,04</b>

**Tabela B47:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,921$ ,  
 $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0227$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
590,41	859	7,04E+04	75,90	177,67	0,43
533,00	775	6,31E+04	69,78	144,80	0,48
501,99	730	5,91E+04	60,50	128,44	0,47
472,87	688	5,54E+04	50,61	113,97	0,44
423,35	616	4,92E+04	43,29	91,35	0,47
389,11	566	4,49E+04	35,94	77,17	0,47
349,10	508	4,00E+04	28,48	62,12	0,46
288,49	420	3,25E+04	22,72	42,42	0,54
230,05	335	2,55E+04	15,22	26,97	0,56
182,58	266	1,99E+04	9,38	16,99	0,55
139,44	203	1,48E+04	4,40	9,91	0,44
100,91	147	1,05E+04	2,51	5,19	0,48
				$K_m$	0,49
				$\sigma$	0,04

**Tabela B48:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,895$ ,  
 $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0314$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=31,3$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	$K$
367,62	889	6,28E+04	75,39	190,27	0,40
348,56	842	5,92E+04	69,78	171,05	0,41
316,45	765	5,32E+04	67,94	140,99	0,48
297,74	720	4,98E+04	58,28	124,81	0,47
276,35	668	4,58E+04	49,93	107,52	0,46
251,31	607	4,13E+04	41,89	88,92	0,47
218,74	529	3,54E+04	34,80	67,36	0,52
194,01	469	3,10E+04	26,54	53,00	0,50
164,88	399	2,59E+04	17,72	38,27	0,46
128,28	310	1,96E+04	11,05	23,17	0,48
35,90	87	4,81E+03	0,66	1,81	0,36
				$K_m$	0,46
				$\sigma$	0,04

**Tabela B49:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,858$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0521$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=25,7$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
359,13	868	4,75E+04	72,36	181,59	0,40
345,88	836	4,55E+04	72,00	168,43	0,43
316,83	766	4,11E+04	69,80	141,33	0,49
301,00	727	3,88E+04	58,98	127,55	0,46
282,77	683	3,61E+04	50,79	112,57	0,45
258,57	625	3,26E+04	41,39	94,13	0,44
230,12	556	2,85E+04	37,26	74,55	0,50
208,21	503	2,55E+04	29,35	61,03	0,48
168,82	408	2,00E+04	18,65	40,13	0,46
123,08	297	1,40E+04	10,16	21,33	0,48
89,17	216	9,67E+03	5,98	11,19	0,53
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,47</b>
				<b>σ</b>	<b>0,03</b>

**Tabela B50:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,840$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0645$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=27,2$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
353,58	855	4,25E+04	75,10	176,01	0,43
337,58	816	4,03E+04	72,42	160,45	0,45
310,37	750	3,65E+04	58,19	135,63	0,43
286,42	692	3,33E+04	50,60	115,50	0,44
258,72	625	2,96E+04	41,96	94,24	0,45
230,32	557	2,59E+04	33,08	74,68	0,44
203,36	492	2,24E+04	23,63	58,23	0,41
131,97	319	1,36E+04	12,05	24,52	0,49
95,14	230	9,27E+03	4,75	12,74	0,37
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,43</b>
				<b>σ</b>	<b>0,03</b>

**Tabela B51:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,832$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,0869$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=28,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
314,72	761	2,90E+04	54,94	139,45	0,39
290,03	701	2,64E+04	55,08	118,43	0,47
269,16	651	2,42E+04	36,59	102,00	0,36
249,10	602	2,21E+04	30,14	87,36	0,35
225,47	545	1,97E+04	28,98	71,57	0,40
193,66	468	1,65E+04	22,74	52,80	0,43
156,28	378	1,28E+04	12,90	34,39	0,38
118,96	288	9,31E+03	7,61	19,92	0,38
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,40</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,04</b>

**Tabela B52:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,817$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1109$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=29,6$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
344,34	832	2,79E+04	70,89	166,93	0,42
327,10	791	2,63E+04	58,26	150,64	0,39
300,95	727	2,38E+04	46,96	127,51	0,37
270,84	655	2,10E+04	39,75	103,28	0,38
248,96	602	1,90E+04	35,02	87,27	0,40
221,85	536	1,66E+04	29,02	69,29	0,42
201,76	488	1,48E+04	23,98	57,31	0,42
171,23	414	1,22E+04	17,69	41,28	0,43
135,71	328	9,28E+03	9,91	25,93	0,38
98,18	237	6,33E+03	4,52	13,57	0,33
				<b>K<sub>m</sub></b>	<b>0,39</b>
				<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,03</b>

**Tabela B53:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,830$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,1965$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=30,1$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,00$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
334,25	808	1,40E+04	58,46	157,30	0,37
266,03	643	1,07E+04	43,44	99,64	0,44
242,07	585	9,59E+03	28,20	82,50	0,34
213,80	517	8,30E+03	25,83	64,36	0,40
189,80	459	7,22E+03	18,44	50,72	0,36
161,82	391	5,99E+03	12,96	36,87	0,35
129,92	314	4,63E+03	8,34	23,76	0,35
101,35	245	3,46E+03	5,65	14,46	0,39
<b>K<sub>m</sub></b>					<b>0,38</b>
<b><math>\sigma</math></b>					<b>0,03</b>

**Tabela B54:** Dados de coeficiente de perda para redução-CMC,  $n=0,825$ ,  $k(\text{dina.s}^n/\text{cm}^2)=0,2406$ ,  $T_m(^{\circ}\text{C})=32,4$  e  $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)=1,01$ .

$v_1$ (cm/s)	$\gamma^*$ (s <sup>-1</sup> )	$Re_{MR}$	$h_s$ (cm)	$v_2^2/2g$ (cm)	<b>K</b>
319,90	773	1,13E+04	59,99	144,08	0,42
298,65	722	1,04E+04	56,45	125,58	0,45
280,50	678	9,68E+03	52,57	110,77	0,47
264,30	639	9,02E+03	46,05	98,35	0,47
249,81	604	8,45E+03	38,61	87,86	0,44
223,23	540	7,40E+03	28,84	70,16	0,41
193,53	468	6,26E+03	20,45	52,73	0,39
161,49	390	5,06E+03	14,62	36,72	0,40
131,05	317	3,96E+03	8,68	24,18	0,36
<b>K<sub>m</sub></b>					<b>0,42</b>
<b><math>\sigma</math></b>					<b>0,04</b>



