

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

REOLOGIA E ESCOAMENTO TURBULENTO  
DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO

—

Autor: *Gerson Luiz Vieira Coelho*  
Orientador: *Cesar Costapinto Santana*

Tese submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas - UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Campinas, SP - Brasil

FEVEREIRO DE 1982

**UNICAMP**  
**BIBLIOTECA CENTRAL**

1985  
1986  
1987  
1988  
1989  
1990  
1991  
1992

À minha mãe Maria de Lourdes pelo incentivo, e a minha esposa Maria José pelo amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana pela sua dedicada orientação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Alexandre F. da Rocha Pereira pelas sugestões e apoio prestado.

Ao Prof. Dr. Giulio Massarani pelas facilidades experimentais na obtenção dos dados para caracterização da partícula.

Ao acadêmico Sergio Fiorelo Clemente pelo auxílio nos trabalhos experimentais.

Aos Professores, Funcionários e Alunos do DEQ - FEC pelo incentivo.

À SAMARCO MINERAÇÃO S.A. pelo fornecimento do concentrado de minério de ferro utilizado nas experiências.

À UFRRJ e ao PICD/CAPES pela oportunidade e concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

Foram realizados neste trabalho estudos experimentais no escoamento de suspensões de finos de minério de ferro (Hematita) a várias concentrações e temperaturas, nos regimes laminar e turbulento.

Para a obtenção dos dados experimentais no regime laminar foi utilizado um reômetro capilar de tubos descartáveis sendo determinado o comportamento reológico das suspensões de minério de ferro na faixa de concentração de 25% a 75% em peso e nas temperaturas de 20, 30 e 40°C. Na interpretação dos resultados experimentais foram associadas às suspensões os modelos reológicos de fluidos de Bingham e de fluido do tipo "Power Law", visando a caracterização das suspensões para a previsão das perdas por atrito no escoamento laminar e turbulento.

Os dados experimentais no escoamento turbulento foram obtidos em uma instalação piloto com tubos de 2,71cm e 5,22cm de diâmetros, para suspensões com concentrações de 40%, 50% e 65% em peso.

A partir das várias correlações existentes na literatura o fator de atrito no escoamento turbulento foi calculado e comparado com valores experimentais visando analisar a validade e adequação das mesmas, objetivando o cálculo de potência de bombeamento.

### SUMMARY

Experimental studies on the laminar and turbulent tube flow of iron ore suspensions were carried out.

A special rheometer operating with disposable tubes was utilised in determining the rheological parameters of the suspensions. The concentrations, by weight, ranged from 25% to 75% and the temperatures used were 20, 30 and 40°C

The behavior of the suspensions were fitted by the rheological models of Bingham and Power Law, for the calculation of friction losses for either laminar and turbulent tube flow.

Experimental data in the turbulent tube flow were carried out in pilot plant with tubes of 2,71 and 5,22cm inner diameter and concentrations by weight of 40%, 50% and 65%.

Friction factors in the turbulent region was calculated with experimental ones obtained in this work in order to check the correlations recommended and also to calculate pumping power in slurries pipelines.

ÍNDICE

	página
CAPÍTULO I - Introdução .....	01
CAPÍTULO II - Características do Transporte Hidráulico de Sólidos .....	04
II.1. Características e Tipos de Suspensões ..	04
II.2. Suspensões Homogêneas: Comportamento Não-Newtoniano.....	05
II.3. Escoamento de Suspensões de Minério de Ferro: Discussão sobre os Trabalhos da Literatura .....	08
CAPÍTULO III - Aspectos Teóricos do Escoamento Laminar, de Transição e Turbulento .....	11
III.1. Regime Laminar .....	11
III.1.1. Modelo de <i>Bingham</i> .....	12
III.1.2. Modelo de <i>Ostwald-de Waele</i> .....	13
III.2. Regime de Transição .....	14
III.3. Regime Turbulento .....	19
CAPÍTULO IV - Equipamento e parte Experimental .....	24
IV.1. Reômetro Capilar .....	24
IV.2. Descrição da Instalação Piloto .....	24
IV.3. Caracterização da Partícula e das Suspensões .....	28
CAPÍTULO V - Resultados .....	35
V.1. Resultados Experimentais .....	35
V.1.1. Regime Laminar .....	35
V.1.2. Regime Turbulento .....	35
V.2. Resultados Calculados .....	42
V.2.1. Parâmetros Reológicos .....	42
V.2.2. Estimativa da Velocidade de Transição ..	42

	página
V.2.3. Método de <i>Bowen</i> .....	42
V.2.4. Fator de Atrito no Escoamento Turbulento .....	54
CAPÍTULO VI - Análise dos Resultados .....	61
VI.1. Regime Laminar .....	61
VI.2. Transição Laminar-Turbulento .....	63
VI.3. Regime Turbulento .....	63
CAPÍTULO VII - Conclusões e Sugestões .....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
APÊNDICES	
A .....	75
B .....	77
C .....	84

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

O transporte de minério e partículas sólidas em geral na forma de suspensões através de tubulações tem se revelado como uma alternativa econômica para a exploração de matérias primas localizadas em jazidas situadas a grandes distâncias. Os estudos de viabilidade tecnológica, realizados principalmente por *Wasp et al* (1), indicam que esses sistemas possuem um alto grau de confiabilidade e um baixo custo operacional, resultando sempre um balanço econômico favorável mesmo em relação ao transporte ferroviário, quando a vazão de sólidos a ser transportado é superior a 1 milhão de toneladas por ano.

No caso específico de minérios de ferro existem em operação atualmente, em diferentes países, vários sistemas cujas características são resumidas na Tabela I.1. Destaca-se entre esses o mineroduto da SAMARCO, no qual é transportado uma suspensão do minério que é objeto de estudo no presente trabalho.

Tendo em vista que os métodos de beneficiamento do minério inclui a moagem, que além de aumentar o teor de ferro, facilita a pelotização, o minério beneficiado aparece na forma de concentrados de partículas finas como parte do processo de produção. Em geral esse minério de ferro beneficiado possui 80% em peso das partículas com tamanhos que passam pela malha de 325 mesh.

Vários dos trabalhos que tratam do escoamento de suspensões concentradas constituídas por sólidos finos, e que serão mencionados na revisão da literatura, mostram que geralmente o comportamento reológico das mesmas é não-newtoniano. Sendo o escoamento no transporte de partículas realizado na faixa turbulenta, verifica-se que vários aspectos desse escoamento necessitam ser melhor esclarecidos, apesar do desenvolvimento tecnológico dos minerodutos já se encontrar em uma fase bastante adiantada.

Assim é que, além de efetuar a determinação dos parâmetros reológicos em faixas convenientes de temperatura e concentração, é de grande importância estudar a extensão dos resultados para a previsão da queda de pressão no escoamento turbulento e também das velocidades onde ocorre a transição do regime laminar para o turbulento.



TABELA (1.1) - MINERODUTOS PARA O TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MINÉRIO DE FERRO \*\*

NOME/LOCALIZAÇÃO	COMPRIMENTO (Km)	DIÂMETRO (Cm)	CAPACIDADE (MILHÕES TON./ANO)	DIÂMETRO MÁXIMO DE PARTÍCULA ( $\mu\text{m}$ )	OPERAÇÃO (ANO)
SAVAGE RIVER/AUSTRALIA	84,8	22,9	2,3	147	1967
WAIPIPI/NOVA ZELÂNDIA	9,6	20,3-30,5	1,0	589	1971
PEÑA COLORADA/MÉXICO	48,0	20,3	1,8	147	1974
LAS TRUCHAS/MÉXICO	27,2	20,3	1,5	104	1976
SIERRA GRANDE/ARGENTINA	32,0	20,3	2,1	74	1976
SAMARCO/BRASIL	400,0	50,8	12,0	74	1977
KUDREMUKH/INDIA	57,6	50,8-55,9	10,0	-	*
- /AFRICA	560,0	27,7	6,6	-	*

\* EM PLANEJAMENTO

\*\* CONCENTRAÇÃO MÉDIA DA SUSPENSÃO: 60% EM PESO

O presente trabalho foi realizado com a utilização de concentrado de Hematita originária de Minas Gerais, Brasil, e está basicamente dividido em duas partes:

- 1) Obtenção de dados experimentais no regime laminar e sua interpretação através de modelos reológicos. Para a consecução desses objetivos foi utilizado um reômetro capilar de características convenientes para ensaios com suspensões que possuem tendência a sedimentar.
- 2) Obtenção de dados experimentais no escoamento turbulento em tubos com diâmetros de 2,71cm e 5,22cm de modo a analisar as várias sistemáticas de cálculo existentes na literatura, visando testar a validade e adequação das mesmas e propor métodos seguros para a extrapolação dos resultados, cujo objetivo é o cálculo de potência de bombeamento.

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS

#### II.1. CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE SUSPENSÕES

No projeto de um sistema de tubulações para o transporte hidráulico, as características e tipo de suspensão a ser transportada devem ser conhecidas. Normalmente deparamos com os 2 tipos básicos que se seguem:

- a) Suspensões Heterogêneas
- b) Suspensões Homogêneas

As suspensões Heterogêneas, também conhecidas como suspensões que sedimentam, constituídas em sua maioria de partículas grandes e densas, em geral são transportadas em baixas concentrações de sólidos. As fases líquida e sólida guardam amplamente suas identidades em separado e o aumento na viscosidade com relação ao líquido transportador não chega a ser significativa.

No transporte deste tipo de suspensões onde ocorre o escoamento heterogêneo, verifica-se que mesmo a altas velocidades não existe uma perfeita distribuição de sólidos ao longo do percurso, sendo que no escoamento horizontal chega-se a ter pronunciados gradientes de concentração ao longo do eixo vertical da tubulação. Alguns exemplos dessas suspensões são as formadas por água e sólidos granulados em geral.

As suspensões Homogêneas, também conhecidas como suspensões que não sedimentam e em geral possui propriedades não-newtonianas, constituída em sua maioria de partículas finas e uma alta concentração de sólidos. As fases iniciais não mais guardam as suas propriedades originais e verifica-se um substancial aumento na viscosidade comparada com a do fluido transportador.

No escoamento dessas suspensões homogêneas com velocidades atuais de projeto, pode-se considerar que as partículas sólidas estão uniformemente distribuídas na seção transversal do duto. Alguns exemplos destas suspensões são: despejos de esgotos, concentrados de partículas finas de calcário, minério de

ferro, óxido de tório, etc.

A Figura (II.1) mostra a posição dos dois tipos básicos de escoamento em relação a algumas situações que ocorrem aos diferentes regimes de escoamento.

Tanto no escoamento de suspensões Homogêneas como no de Heterogêneas, métodos de cálculo são usados para determinar, além da queda de pressão, a velocidade crítica. Na Figura (II.2) vê-se um gráfico logaritmico de queda de pressão contra velocidade e dependendo da suspensão possui uma determinada velocidade onde ocorrem modificações importantes no sistema sólido-fluido. No caso de suspensões Heterogêneas a velocidade crítica no qual o leito de partículas começa a se formar é conhecida como velocidade de depósito ( $v_D$ ), enquanto que para as suspensões Homogêneas a velocidade crítica corresponde a uma transição do regime de escoamento turbulento para laminar e é conhecido como velocidade de transição ( $v_T$ ).

## II.2. SUSPENSÕES HOMOGÊNEAS: COMPORTAMENTO NÃO-NEWTONIANO

As suspensões homogêneas com concentração elevada de sólidos, em geral exibe propriedades de líquidos não-newtonianos.

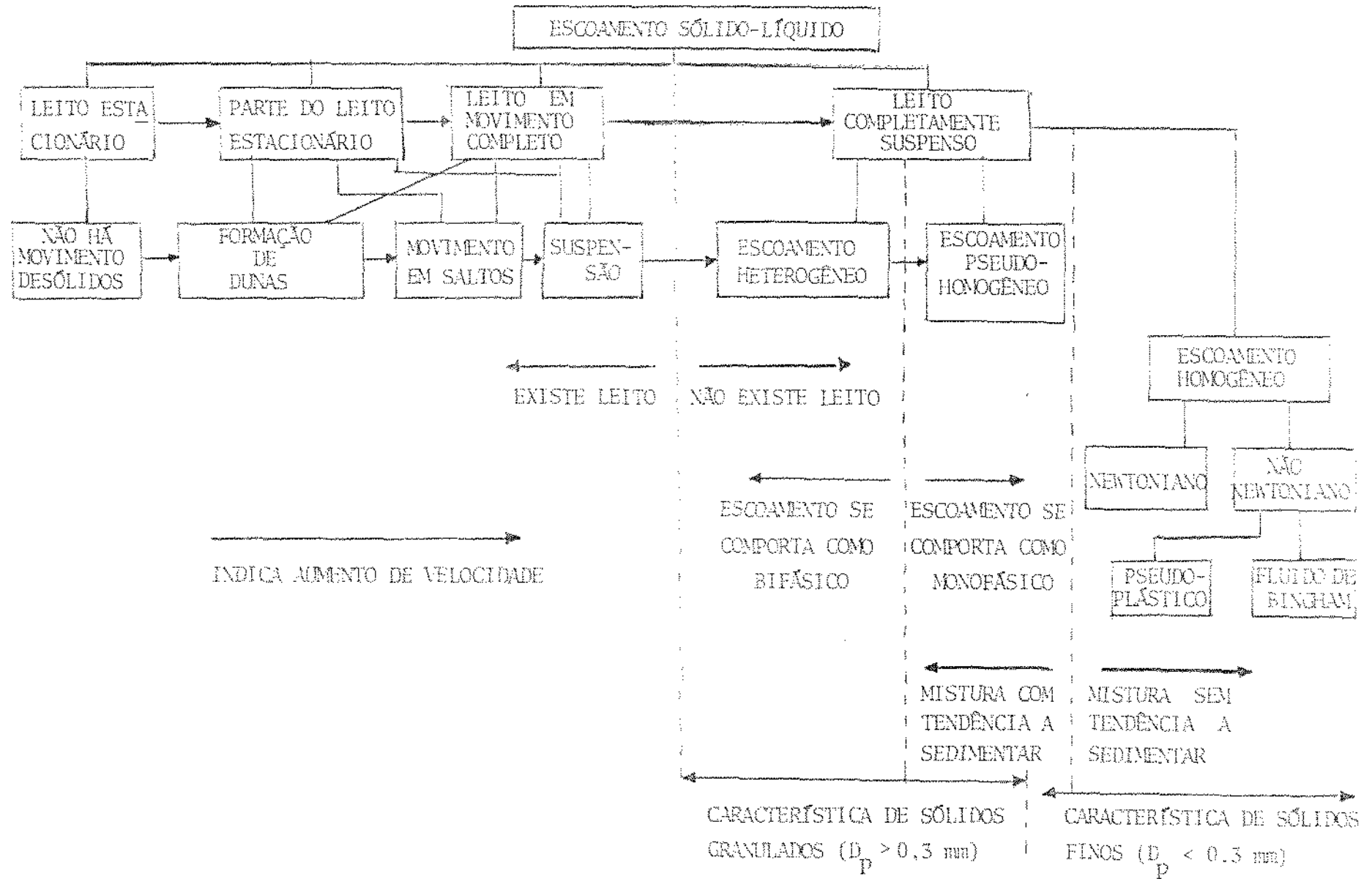
A mecânica dos fluidos não-newtonianos é uma curiosa combinação de teoria e empirismo entrelaçada com aproximações e hipóteses, sendo que a teoria não tem alcançado o mesmo estágio de desenvolvimento como tem a mecânica dos fluidos newtonianos.

Portanto, a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação sem mencionar a composição, as variações termodinâmicas e o tempo tem sido assunto para algumas análises teóricas objetivando a obtenção de uma expressão geral satisfatória a todos os tipos de fluidos. A despeito das deficiências, fluidos não-newtonianos e suspensões são tratados em grande escala em muitas indústrias. Como nenhuma destas equações gerais de estado tem sido suficientemente satisfatória para ser usada no projeto de engenharia, utilizam-se em muitas situações modelos simplificados.

Dois de tais modelos empíricos mais comumente usados são os seguintes:

- a) Pseudoplástico ou fluido de *Ostwald-de Waele*, ( ou

FIGURA (11.1) - COMPARAÇÃO DE REGIMES PARA O TRANSPORTE HIDRÁULICO HORIZONTAL.



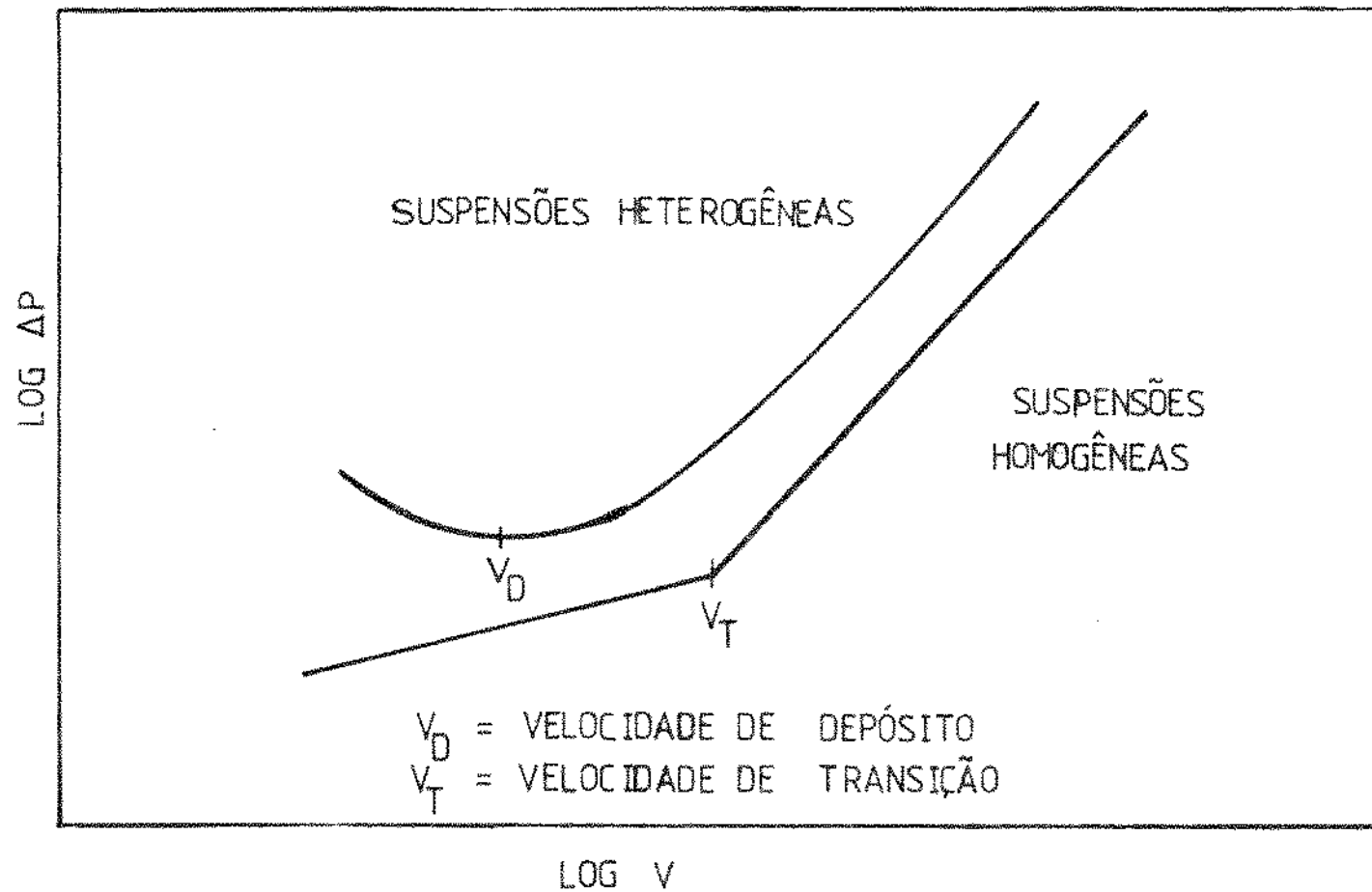


FIGURA. II.2 - VELOCIDADES CRÍTICAS PARA DIFERENTES TIPOS DE SUSPENSÕES

tipo "Power law"), descrito pela equação:

$$S = K \lambda^n \quad (II.1)$$

b) Plástico de *Bingham*, cuja equação reológica é dada por:

$$S = S_0 + \eta \lambda \quad (II.2)$$

Nessas equações,

$S$  = Tensão cisalhante

$S_0$  = Tensão cisalhante limite

$\eta$  = Coeficiente de rigidez

$K$  = Índice de consistência

$n$  = Índice de comportamento do escoamento

$\lambda$  = Taxa de deformação

Tanto o escoamento laminar como o turbulento destas suspensões são possíveis e industrialmente significantes. Maiores detalhes e aspectos teóricos serão discutidos no Capítulo III.

### II.3. ESCOAMENTO DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO: DISCUSSÃO SOBRE OS TRABALHOS DA LITERATURA

Poucos são os trabalhos existentes na literatura com relação ao transporte de concentrados de partículas finas de minério de ferro. Dos trabalhos existentes, a maioria deles foram realizados com minério transportado no mineroduto de *Savage River*, Tabela (I.1), ainda assim grande parte se fixaram mais nos fatores tecnológicos tais como abrasão, corrosão e aspectos econômicos. Discutiremos a seguir apenas as contribuições mais representativas com o assunto tratado, procurando evidenciar as contribuições mais relevantes.

*Linford e Saunders* (3), realizaram experiências com pirita, com partículas entre 75 a 65% menores que 325 mesh e densidade de 4,5 g/cm<sup>3</sup>. As medidas viscométricas foram feitas com viscosímetro capilar com concentrações de sólidos de 10 a 40% em volume (33 a 75% em peso), sendo porém muito pequena a quantidade

de de dados experimentais obtidos. O modelo de *Bingham* foi usado para prever a queda de pressão no mineroduto, usando o número de *Hedstrom* para definir se o regime é laminar ou turbulento. Por outro lado, o modelo pseudoplástico mostrou-se bastante satisfatório para taxas de deformação acima de  $200 \text{ S}^{-1}$ . O efeito de concentração foi observada na tensão limite e na viscosidade plástica. A velocidade crítica foi calculada por correlações existentes e comparadas com valores experimentais para várias concentrações e vários diâmetros de tubo.

*Schiek et all* (5) realizaram estudos com concentrados de minério de ferro tanto com partículas finas como grossas, com teor de ferro de 60% e densidade  $5,245 \text{ g/cm}^3$ . Verificaram o efeito da distribuição do tamanho de partícula na queda de pressão em tubos de 2 polegadas de diâmetro, determinando experimentalmente valores de queda de pressão tanto para partículas finas como para grossas, a várias concentrações de sólidos, numa faixa aproximada de 5 a 38% em volume. Esses autores ainda efetuaram cálculos do consumo de energia necessário para o transporte de finos de minério de ferro como uma função de velocidade para várias concentrações com tubos de 2 polegadas. É importante observar que a tendência estabelecida para concentrados de grossos de minério de ferro é mantida, isto é, que o consumo de energia decresce com o aumento na concentração de sólidos. Igualmente importante é a redução acentuada no consumo de energia com o decréscimo no tamanho médio da partícula. Para amostras de grossos com diâmetro médio de  $230 \mu\text{m}$ , foram necessários uma energia mínima de  $0.56 \text{ Hp hr/ton. Km}$  já para o equivalente de finos com diâmetro médio de  $30 \mu\text{m}$  foram necessários  $0.25 \text{ Hp hr/ton. Km}$ .

Na obtenção dos dados reológicos *Schiek et all* usaram um viscosímetro capilar horizontal e suspensões de concentrados de partículas finas de minério de ferro, sendo comentado pelos autores que as suspensões mostraram uma tendência a formação de depósitos estacionários no fundo do tubo, mesmo em altas concentrações de sólidos. Portanto esses dados não podem ser considerados como uma informação útil.

*Jennings* (2,4), realizou algumas experiências com Hematita contendo de 85 a 95% de Óxido Ferrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) com um teor médio de 62,5% de ferro, densidade de  $4,70 \text{ g/cm}^3$ , sendo o miné-



rio moído de modo a obter partículas com tamanhos que passam totalmente pela malha de 325 mesh.

Estudos reológicos foram realizados com viscosímetro FANN V-G rotativo, mostrando que suspensões de minério de ferro em água são não-newtonianas sendo que a faixa de equipamento limita a concentração de sólidos de 28% em volume (65% em peso).

Os resultados obtidos mostraram que a concentração de sólidos e distribuição de tamanhos das partículas tem muito mais efeito nas propriedades reológicas e no escoamento de suspensões de minério de ferro do que a temperatura. Também foi observado o efeito de diversos dispersantes comercialmente utilizados nas suspensões entre eles o lignosulfonato que aumenta acentuadamente o escoamento de concentrados contendo Hematita finalmente dividida, com granulometria inferior a 325 mesh.

*Carleton & Cheng* (6), testaram em torno de 50 correlações para a predição da velocidade crítica e compararam com os valores medidos em dois sistemas de tubulações. O primeiro com diâmetro de tubo de 5,3cm e suspensões de Óxido de Ferro a 25% em peso com tamanho de partícula de 50  $\mu\text{m}$ , o segundo com diâmetro de 24,4cm e suspensão de minério de ferro a 60% em peso. Verificaram que não existe uma boa aproximação entre a teoria e a experiência, sendo que em média os valores calculados são inferiores em aproximadamente 30% para diâmetro de 5,3cm, enquanto que para o diâmetro de 24,4cm as correlações superestimam a velocidade crítica em torno de 120%. Portanto, o que se observa é que em relação a essa variável é que existe uma variação bastante acentuada entre as predições dadas por diversas correlações para tubos de diâmetros maiores. Acredita-se que a razão para isto é que as correlações são derivadas de resultados experimentais geralmente obtidos com tubos de diâmetros menores e portanto algum fenômeno físico fundamental pode não ser relevante ao escoamento em tubos de diâmetros maiores.

Com relação a estudos sistemáticos que visam a previsão da queda de pressão no escoamento turbulento a partir da caracterização reológica das suspensões de minério de ferro, observa-se uma lacuna na literatura excetuando-se o trabalho de *Lingford & Saunders* (3), mencionado anteriormente, o qual foi realizado com minério pirita.

## CAPÍTULO III

ASPECTOS TEÓRICOS DO ESCOAMENTO LAMINAR, DE TRANSIÇÃO E TURBU-  
LENTOIII.1. REGIME LAMINAR

Na caracterização dos modelos dos fluidos é necessário que sejam determinados no regime laminar os parâmetros reológicos do mesmo. Assim para fluidos do tipo plástico de Bingham, equação (II.2), deverão ser obtidos o coeficiente de rigidez e a tensão cisalhante, e para os fluidos pseudo plástico equação (II.1), os índices de escoamento e de consistência.

Rabinowitsch (50) & Mooney (51) mostraram que para escoamento estacionário e laminar em duto cilíndrico, sem efeito de entrada no tubo, que a velocidade média no escoamento pode ser relacionada através do parâmetro  $Y = \frac{8v}{D}$  com a tensão de cisalhamento  $S$  através da expressão:

$$Y = \frac{4}{S_w^3} \int_0^{S_w} S^2 F(S) dS \quad (III.1)$$

a qual é válida para uma função reológica geral do tipo:

$$\lambda = F(S) \quad (III.2)$$

A partir da equação (III.1), com a utilização de "regra de Leibnitz" obtém-se a relação entre a taxa de deformação  $\lambda$ , a tensão de cisalhamento na parede  $S_w$  e a pseudo taxa de deformação  $Y$  :

$$\lambda = \left[ \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \left( \frac{d \ln S_w}{d \ln Y} \right) \right] Y \quad (III.3)$$

Sendo:

$$S_w = \frac{D \Delta P}{4L} \quad (III.4)$$

e

$$Y = \frac{8v}{D} = \frac{32 W}{\pi \rho D^3} \quad (III.5)$$

onde:

- $S_w$  = Tensão cisalhante na parede do tubo;  
 $D$  = Diâmetro do tubo;  
 $W$  = Vazão mássica do fluido no tubo;  
 $\Delta P$  = Queda de pressão para um comprimento  $L$   
 $v$  = Velocidade média  
 $\rho$  = Massa específica do fluido

### III.1.1. MODELO DE BINGHAM

Utilizando-se para a função dada pela equação (III.2), o modelo de fluido de *Bingham*, equação (II.2), obtém-se a integração da equação (III.1), para as condições de contorno de um tubo circular, obtendo a denominada equação de *Buckingham* (49):

$$\frac{8v}{D} = \frac{S_w}{\eta} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{S_o}{S_w} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{S_o}{S_w} \right)^4 \right] \quad (\text{III.6})$$

onde desprezando o termo de 4<sup>a</sup> potência pode-se obter uma expressão mais simples para  $S_w$ :

$$S_w = \eta \left( \frac{8v}{D} \right) + \frac{4}{3} S_o \quad (\text{III.7})$$

*Hedstrom* (44) considerando que  $\Delta P = F_1 (D, L, v, \rho, \eta, S_o)$  obteve por análise dimensional

$$f = F_2 (Re^*, He) \quad (\text{III.8})$$

sendo a função  $F_2$  dada por:

$$\frac{1}{Re^*} = \frac{f}{16} - \frac{1}{6} \frac{He}{(Re^*)^2} + \frac{1}{3} \frac{(He)^4}{(Re^*)^8 f^3} \quad (\text{III.9})$$

onde o  $Re^*$ , número de *Reynolds* para o modelo de *Bingham*;  $He$ ,  $\underline{n\bar{u}}$

mero de *Hedstrom*;  $f$ , fator de atrito de *Fanning* são definidos como:

$$Re^* = \frac{Dv \rho}{\eta} \quad (\text{III.10})$$

$$He = \frac{S_o D^2 \rho}{\eta^2} \quad (\text{III.11})$$

$$f = \frac{16}{Re^*} = \frac{D \Delta P}{2 \rho v^2 L} \quad (\text{III.12})$$

Um gráfico em coordenadas bilogaritmica de Número de *Reynolds* contra fator de atrito tendo o Número de *Hedstrom* como parâmetro na região laminar expressa melhor a equação (III.9), sendo apresentado por *Wasp et all* (1).

### III.1.2. MODELO DE OSTWALD-DE WAELE

Utilizando-se o modelo reológico descrito pela equação (II.1), obtêm-se a partir da equação de *Rabinowitsch & Mooney* a relação entre  $S_w$  e  $\frac{8v}{D}$  para um fluido que segue o modelo de *Ostwald-de Waele*:

$$S_w = K \left[ \frac{8v}{D} \right]^n \left[ \frac{3n + 1}{4n} \right]^n \quad (\text{III.13})$$

É importante verificar que ainda no regime laminar a equação (III.12) é satisfeita se definirmos o Número de *Reynolds* de *Shaver & Merril* por:

$$Re_{S.M.} = \frac{Dv \rho}{K \left( \frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (\text{III.14})$$

*Metzner & Reed* (21) reddefiniram o modelo de *Ostwald-de Waele* em termos de velocidade média e de tensão cisalhante na parede, obtendo para este modelo modificado:

$$\frac{D \Delta P}{4L} = K' \left[ \frac{8v}{D} \right]^{n'} \quad (\text{III.15})$$

A partir dessa expressão, a expressão do fator de atrito, equação (III.12), é válida ainda no escoamento laminar se definirmos o número de *Reynolds* de Metzner e Reed por:

$$\text{Re}_{\text{M.R.}} = \frac{D^{n'} v^{2-n'} \rho}{K' 8^{n'-1}} \quad (\text{III.16})$$

### III.2. REGIME DE TRANSIÇÃO

A velocidade na qual a Transição de laminar para turbulento ocorre é ditado pela definição do Número de *Reynolds*, para o qual tem-se diversas interpretações, dependendo da definição da viscosidade. Nesse sentido podemos destacar as seguintes:

- viscosidade aparente, definida como:

$$\mu_a = \frac{S_w}{\lambda} \quad (\text{III.17})$$

- viscosidade limite, em altas taxas de deformação,  $\mu_\infty$  (que é igual a  $\eta$  para fluidos de *Bingham*)

- viscosidade efetiva, definida como:

$$\mu_e = \frac{S_w}{\frac{8v}{D}} = \frac{S_w}{Y} \quad (\text{III.18})$$

As viscosidades efetiva e aparente, são relacionadas pela equação (III.3) e tornam-se idênticas para fluidos newtonianos.

*Thomas* [8] mostrou que com o emprego de viscosidade efetiva,  $\mu_e$  para definir o Número de *Reynolds* de transição, obtém-se um meio mais útil de obter valores aproximado da velocidade de transição. Assim substituindo na equação (III.18) a equação (III.7) temos:

$$\mu_e = \eta \left[ 1 + \frac{S_o D}{6 \eta v} \right] \quad (\text{III.19})$$

e

$$(\text{Re}')_T = Dv_T \rho / \eta \left[ 1 + \frac{D S_o}{6 \eta v_T} \right] \quad (\text{III.20})$$

Admitindo que para tubos de diâmetros grandes ( $>2.54\text{cm}$ ), o termo  $\frac{D S_o}{6 \eta v_T}$  é grande comparado com a unidade, a velocidade de transição é dada por:

$$v_T = \sqrt{\frac{(\text{Re}')_T S_o}{6 \rho}} \quad (\text{III.21})$$

Também segundo *Thomas* (48) uma estimativa de ordem de grandeza das condições de transição de laminar para turbulento em tubos circulares é dado por:

$$2000 < \frac{Dv\rho}{\mu_e} < 6000 \quad (\text{III.22})$$

sendo esta a faixa que normalmente é encontrada no regime de transição com fluidos newtonianos.

*Wasp et al* (1) observou que na equação (III.21) não consta a viscosidade de suspensão (coeficiente de rigidez) nem o diâmetro do tubo quando se admite um valor para Número de *Reynolds* de transição, sendo que trabalhos experimentais tem mostrado que  $v_T$  depende destas duas variáveis, apesar da dependência não ser acentuada; deste modo a equação (III.21) deve fornecer apenas uma primeira estimativa da velocidade de transição.

*Durand* (36) usando a definição da viscosidade efetiva dada pela equação (III.19) para definir o Número de *Reynolds* e admitindo para este o valor igual a 2000 para calcular a velocidade de transição, obteve:

$$v_T = \frac{1000 \eta}{D \rho} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{D^2 S_o \rho}{5000 \eta^2}} \right] \quad (\text{III.23})$$

Para o modelo de *Ostwald-de Waele* na definição dada pela equação (III.18),  $S_w$  é substituído pela equação (III.13), obtendo-se:

$$\mu_e = K \left[ \frac{8v}{D} \right]^{n-1} \left[ \frac{3n+1}{4n} \right]^n \quad (\text{III.24})$$

Para o modelo de *Ostwald-de Waele* modificado,  $S_w$  é substituído pela equação (III.15), obtendo-se:

$$\mu_e = K' \left[ \frac{8v}{D} \right]^{n'-1} \quad (\text{III.25})$$

Sendo os parâmetros reológicos,  $n$ ,  $n'$ ,  $K$  e  $K'$  relacionados por:

$$n = n' / \left[ 1 - (dn'/d \ln S)/(3n' + 1) \right] \quad (\text{III.26})$$

$$e \quad K' = K \left[ (3n+1)/4n \right]^n \quad (\text{III.27})$$

Em geral as suspensões, independente do modelo associadas às mesmas, quando são propensas a sedimentar somente podem ser transportadas no regime turbulento e dependendo das propriedades físicas, deve-se sempre exceder a uma "velocidade mínima" de maneira a prevenir a sedimentação.

Spells (23) propôs duas correlações para a cálculo da velocidade de transição. Na primeira dessas correlações, e abaixo da qual ocorre a sedimentação:

$$v_T^{1,225} = 0,0251 \text{ g } d_{85} \left[ \frac{D \rho}{\mu} \right]^{0,775} \left[ \frac{\rho_s - \rho_\ell}{\rho_\ell} \right] \quad (\text{III.28})$$

onde:

- $d_{85}$  = Corresponde ao diâmetro de partículas tal que 85% em peso das partículas são menores que  $d_{85}$ ;
- $\rho_s$  = Massa específica do sólido;
- $\rho_l$  = Massa específica do líquido;
- $\rho$  = Massa específica do fluido (suspensão)
- $C_v$  = Concentração volumétrica;
- $\mu$  = Viscosidade dinâmica do líquido transportador.

Uma segunda correlação foi proposta por *Spells* para o caso de existir uma uniformidade no perfil de concentração:

$$v_T^{1,225} = 0,0741 g d_{85} \left[ \frac{\rho_s}{\rho} \right]^{0,775} \left[ \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right] \quad (III.29)$$

*Sinclair* (24) realizou um considerável número de testes com pó de ferro e também com areia e carvão assim sendo cobriu uma faixa mais ampla de densidades de sólidos do que *Spells*, e propôs as expressões que se seguem para  $v_T$ :

$$v_T = \left[ 0,50 g d_{85} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right]^{0,8} \right]^{1/2} \quad (III.30)$$

para valores pequenos de  $d_{85}/D$  e

$$v_T = \left[ 0,19 g d_{85} \left[ \frac{d_{85}}{D} \right]^{-2} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right]^{0,8} \right]^{1/2} \quad (III.31)$$

para valores comparativamente grandes de  $d_{85}/D$ .

Na Tabela (III.1) temos o resumo das principais correlações para a previsão de  $v_T$ .



Tabela (111.1) - CORRELAÇÕES PARA A PREVISÃO DA VELOCIDADE DE TRANSIÇÃO

AUTOR	CORRELAÇÃO
Sinclair (24)	$v_T = \left[ 0,50 g d_{85} \left( \frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right)^{0,8} \right]^{1/2}$ <p>para <math>d_{85}/D</math> pequeno</p> $v_T = \left[ 0,19 g d_{85} \left( \frac{d_{85}}{D} \right)^{-2} \left( \frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right)^{0,8} \right]^{1/2}$ <p>para <math>d_{85}/D</math> grande</p>
Spells (23)	$v_T^{1,225} = 0,0251 g d_{85} \left( \frac{D\rho}{\mu} \right)^{0,775} \left( \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)$ $v_T^{1,225} = 0,0741 g d_{85} \left( \frac{D\rho}{\mu} \right)^{0,775} \left( \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} \right)$
Thomas (8)	$v_T = \sqrt{\frac{[Re'] So}{6 \rho}}$
Durand (36)	$v_T = \frac{1000 \eta}{D \rho} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{D^2 So \rho}{3000 \eta^2}} \right]$

### III.3. REGIME TURBULENTO

O transporte de suspensões através de tubos em geral é realizado no regime turbulento, sendo portanto de grande importância a predição da queda de pressão nesse escoamento. Os métodos de predição diferem principalmente na definição do Número de *Reynolds*, isto é, na escolha das variáveis que representam o efeito das forças viscosas.

Não existe até agora uma técnica universalmente aceita para predição da perda por atrito em tubos de suspensões e fluidos não-newtoniano no escoamento turbulento. Muitas das correlações existentes são completamente empíricas ou não faz alusão a natureza do escoamento turbulento e são baseadas em dados limitados.

Existem três tendências para correlacionar o fator de atrito de fluidos não-newtoniano no regime turbulento, as quais serão discutidas a seguir.

A primeira dessas tendências consiste na utilização simples dos resultados válidos para o escoamento turbulento de fluidos newtonianos, tanto para tubos lisos como rugosos. Na extensão desses resultados várias definições de viscosidade tem sido usadas para exprimir o número de *Reynolds* do escoamento.

Assim é que *Linford & Saunders* (3) utilizaram a expressão de *Colebrook* (55) para o fator de atrito:

$$f = \left[ -4 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{2 Re_{L.S.} \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (III.32)$$

Na interpretação dos seus resultados, esses autores propuseram para o caso do comportamento como fluido de *Bingham*, um Número de *Reynolds* definido por:

$$Re_{L.S.} = \frac{v D \rho}{\mu_{pl}} \quad (III.33)$$

onde:

$$\mu_{pl} = \frac{S_w - S_o}{Y} \quad (III.34)$$

Outra tendência encontrada na literatura é a de procurar correlacionar os dados experimentais com base em equações do tipo *Blasius*, ou seja:

$$f = B Re^{-b} \quad (\text{III.35})$$

onde  $B$  e  $b$  são respectivamente constante e expoente, funções das propriedades do fluido.

*Thomas* (9) trabalhou com suspensões de Tório, Caulim e Titânio, todas estas suspensões correlacionaram com o modelo de *Bingham* e seguindo esta tendência obteve a correlação:

$$f = \frac{0,079 \left[ \left( \frac{\mu}{n} \right)^{0,48} + \chi^2 \right]}{Re^{*0,25} \left[ \left( \frac{\mu}{n} \right)^{0,15} + \chi^2 \right]} \quad (\text{III.36})$$

onde o Número de *Reynolds* é definido pela equação (III.10) e

$$\chi = \frac{\rho S_o \phi^2}{\mu^2} \quad (\text{III.37})$$

para  $\phi = 1,8 \times 10^{-4}$  cm.

Nas equações (III.36) e (III.37)  $\mu$  representa a viscosidade do fluido transportador.

*Shaver & Merrill* (52) trabalhando com soluções aquosas diluídas de CMC, Carbopol e Polisobutileno em Ciclohexano, correlacionaram com o modelo de *Ostwald-de Waele* o fator de atrito com a equação do tipo *Blasius*:

$$f = 0,079/n^5 (Re_{S.M.})^{2,63/(10,5)^n} \quad (\text{III.38})$$

onde o Número de *Reynolds* de *Shaver & Merrill* é definido pela equação (III.14).

*Bowen* (12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) analisou uma grande quantidade de dados disponíveis para uma variedade bastante

ampla de fluidos com diferentes diâmetros de tubos, propondo baseado numa equação do tipo *Blasius* que a maioria dos dados turbulentos independentes do modelo reológico, podem ser correlacionados por uma relação tipo:

$$S_w D^x = A v^w \quad (\text{III.39})$$

sendo  $A$ ,  $w$  e  $x$  constantes a serem determinadas experimentalmente. *Quader & Wilkinson* (54) consideraram para um escoamento turbulento desenvolvido em tubo liso que

$$S_w = F_3 (v, D, \rho, x, w, A)$$

e por análise dimensional e usando a definição do fator de atrito de *Fanning*, equação (III.12), mostraram que:

$$f = \frac{2}{\text{Re}_B} \quad (\text{III.40})$$

onde  $\text{Re}_B$  o Número de *Reynolds de Bowen* é definido como:

$$\text{Re}_B = \frac{v^{2-w} D^x \rho}{A} \quad (\text{III.41})$$

A terceira e última tendência faz uso da "lei universal" de *Prandtl* para fator de atrito. Equações deste tipo tem a forma geral:

$$\sqrt{1/f} = C \log (\text{Re } f^D) + E \quad (\text{III.42})$$

onde  $C$ ,  $D$  e  $E$  são funções das propriedades reológicas do fluido. Para fluidos newtonianos a equação (III.42) adquire a forma bem conhecida:

$$\sqrt{1/f} = 4,0 \log (\text{Re } \sqrt{f}) - 0,40 \quad (\text{III.43})$$

Simultaneamente com *Shaver & Merrill* um estudo analítico do regime turbulento foi realizado por *Dodge & Metzner* (22) que começaram com o método geral que foi inicialmente usado por

Millikan (53) e tomando por base a equação (III.42), correlacionaram o fator de atrito utilizando o modelo de Ostwald-de Waele modificado. A correlação obtida por Dodge & Metzner se apresenta sob a forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 (n')^{-0,75} \log \left[ \text{Re}_{\text{M.R.}} f^{(1-n'/2)} \right] - 0,4 (n')^{-1,2} \quad (\text{III.44})$$

onde  $\text{Re}_{\text{M.R.}}$  é o Número de Reynolds de Metzner & Reed é definido pela equação (III.16)

Um resumo das principais correlações para o cálculo de  $f$  encontra-se na Tabela (III.2).

TABELA (III.2) - CORRELAÇÃO PARA A PREVISÃO DO FATOR DE ATRITO COM AS RESPECTIVAS DEFINIÇÕES DE NÚMERO DE REYNOLDS.

AUTOR	CORRELAÇÃO	EQUAÇÃO	NÚMERO DE REYNOLDS	EQUAÇÃO
Lingford & Saunders (3)	$f = \left[ -4 \log \left( \frac{\epsilon/D}{5,7} \right) + \frac{2,51}{2 \text{Re}_{L.S.} \sqrt{f}} \right]^{-2}$	(III.32)	$\text{Re}_{L.S.} = \frac{D v \rho}{\mu p l}$	(III.33)
Thomas (9)	$f = 0,079 \left[ \left( \frac{L}{D} \right)^{0,48} + X^2 \right] / \text{Re}^* 0,25 \left[ \left( \frac{L}{D} \right)^{0,15} + X^2 \right]$	(III.36)	$\text{Re}^* = \frac{D v \rho}{\eta}$	(III.10)
Shaver & Merrill (52)	$f = 0,079 / n^5 (\text{Re}_{S.M.})^{2,63} / (10,5)^n$	(III.38)	$\text{Re}_{S.M.} = \frac{D v \rho}{K \left( \frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left( \frac{5n+1}{4n} \right)^n}$	(III.14)
Quader & Wilkinson (54)	$f = 2/\text{Re}_B$	(III.40)	$\text{Re}_B = \frac{v^{2-w} D^x \rho}{A}$	(III.41)
Dodge & Metzner (22)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,0 (n')^{-0,75} \log (\text{Re}_{M.R.} f^{(1-n'/2)}) - 0,4 (n')^{-1,2}$	(III.44)	$\text{Re}_{M.R.} = \frac{D^{n'} v^{2-n'} \rho}{K' 8^{n'-1}}$	(III.16)

## CAPÍTULO IV

### EQUIPAMENTO E PARTE EXPERIMENTAL

#### IV.1. REÔMETRO CAPILAR

Devido a alta densidade das partículas, as suspensões de minério de ferro sedimentam facilmente e desse modo torna-se conveniente para a determinação das propriedades reológicas, o reômetro capilar de tubos descartáveis proposto por *Massarani* (37) e mostrado nas Figuras (IV.1) e (IV.2).

Na montagem tem-se uma combinação do frasco de *Mariotte* com tubos fluxíveis conduzindo a um viscosímetro capilar de custo reduzido e de operação simples. A nova versão do frasco clássico é um recipiente de vidro com sistema de vedação, onde para garantir precisão nas medidas reológicas a tampa foi modificada sustentando uma serpentina de termorregulação acoplada a um banho termostático de forma a garantir um perfeito controle de temperatura, além da inclusão de termômetro, tubo de alimentação de ar e um selo-de-graxa por onde passa o tubo capilar.

Ainda para que se possa ter precisão nas medidas reológicas é necessário que os tubos sejam de boa qualidade. Nas experiências foram usados "espaguete" de PVC fabricados e vendidos comercialmente em diferentes diâmetros, possuindo além de boa circularidade da seção transversal interna uma excelente flexibilidade permitindo que seja enovelado sem sofrer deformação. Outra característica importante é seu baixo custo permitindo que seja descartado depois de usado. A agitação no interior do frasco foi feita com agitador magnético. O banho termostático usado é composto de bomba de demanda, controlador de temperatura (UNITEMP) e unidade de refrigeração (Modelo 114 B) fabricados por FANEM.

Nas Figuras (IV.3) e (IV.4) tem-se aspectos gerais da montagem experimental usada neste trabalho.

#### IV.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

Consiste de um sistema operando em ciclo fechado de aproximadamente 8 metros de extensão horizontal com tubos comerciais de ferro galvanizado com diâmetro interno de 5,22cm e

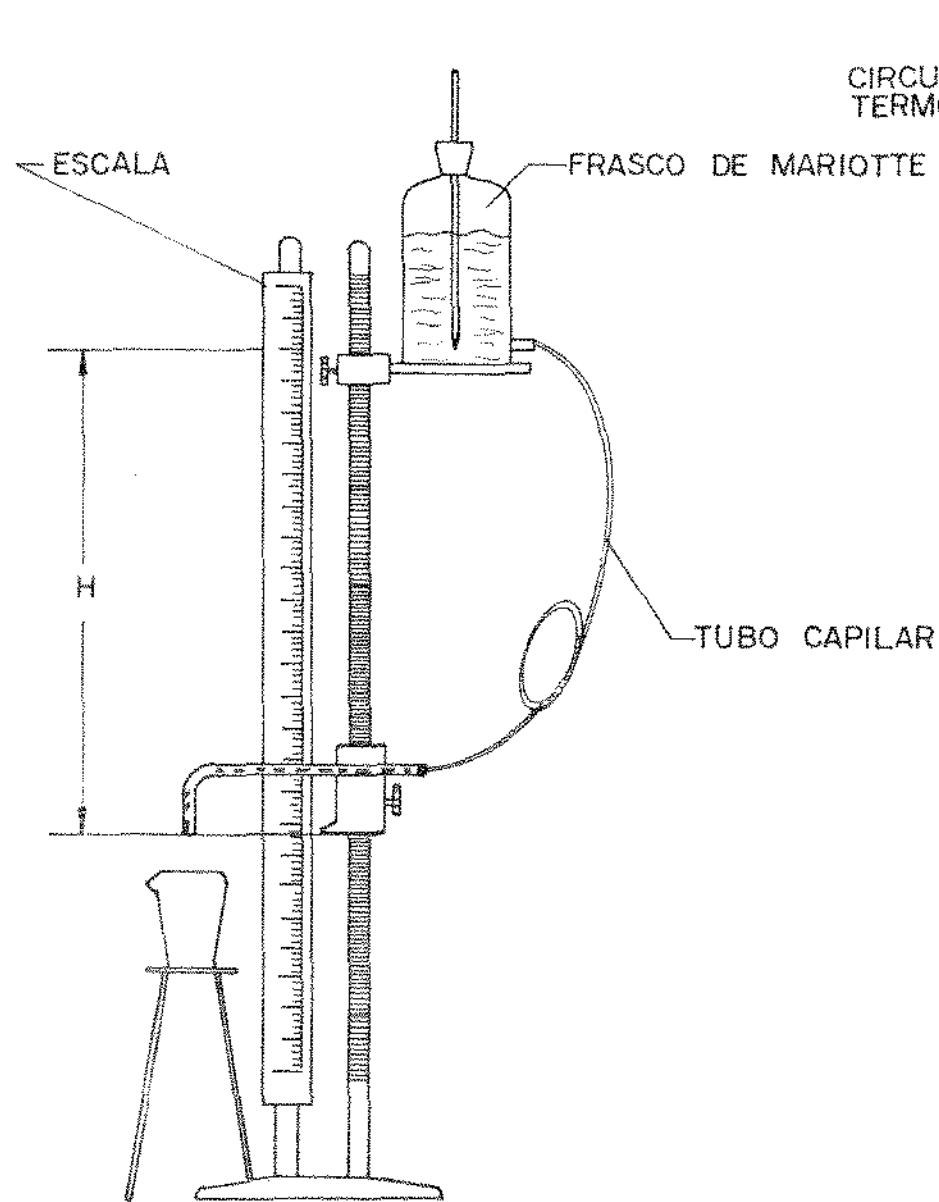


FIG. IV.1- MONTAGEM DO VISCOSIMETRO CAPILAR COM ALIMENTAÇÃO ATRAVÉS DE FRASCO DE MARIOTTE.

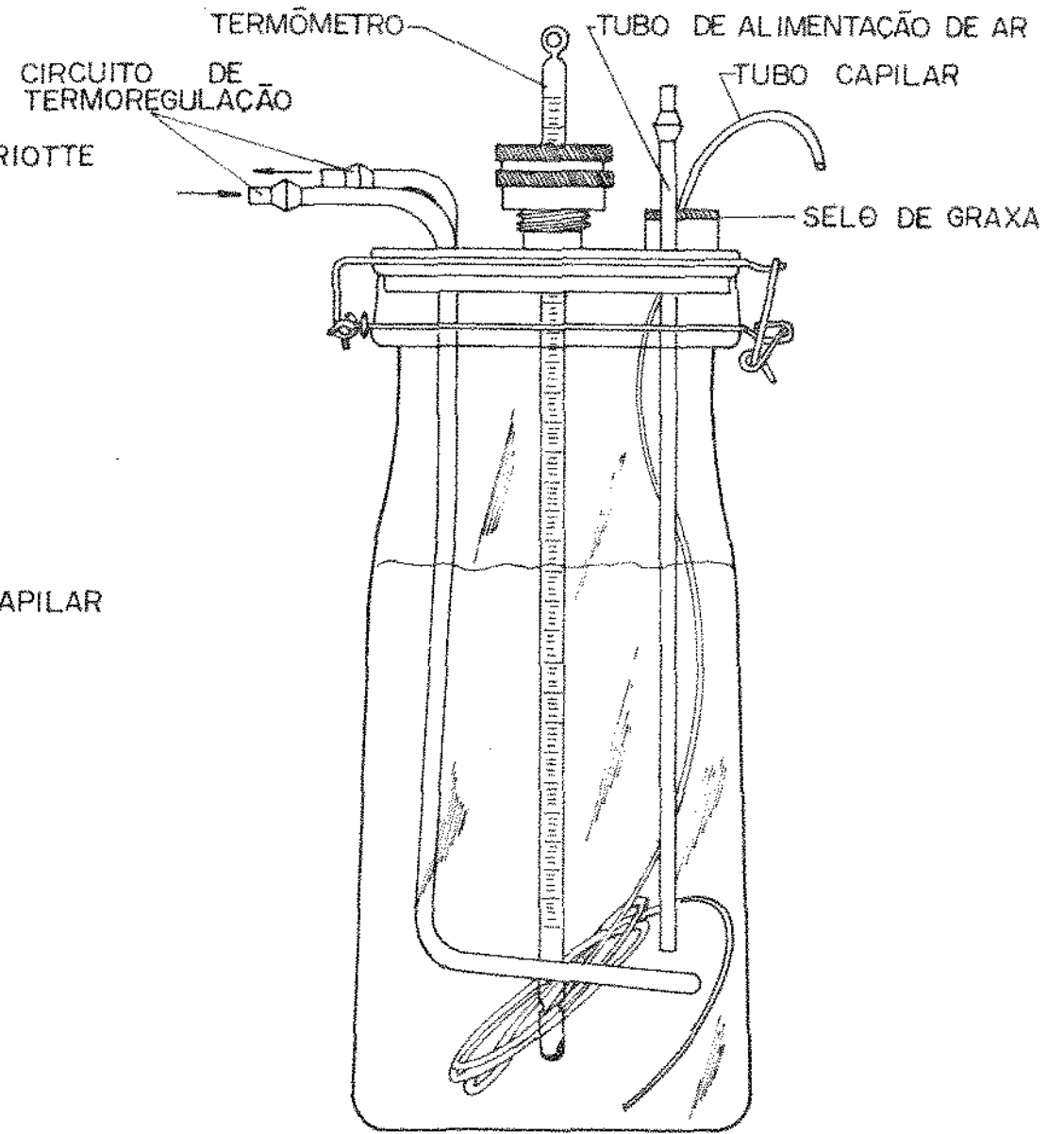


FIG. IV.2- FRASCO DE MARIOTTE PARA TERMOREGULAÇÃO DO FLUIDO.



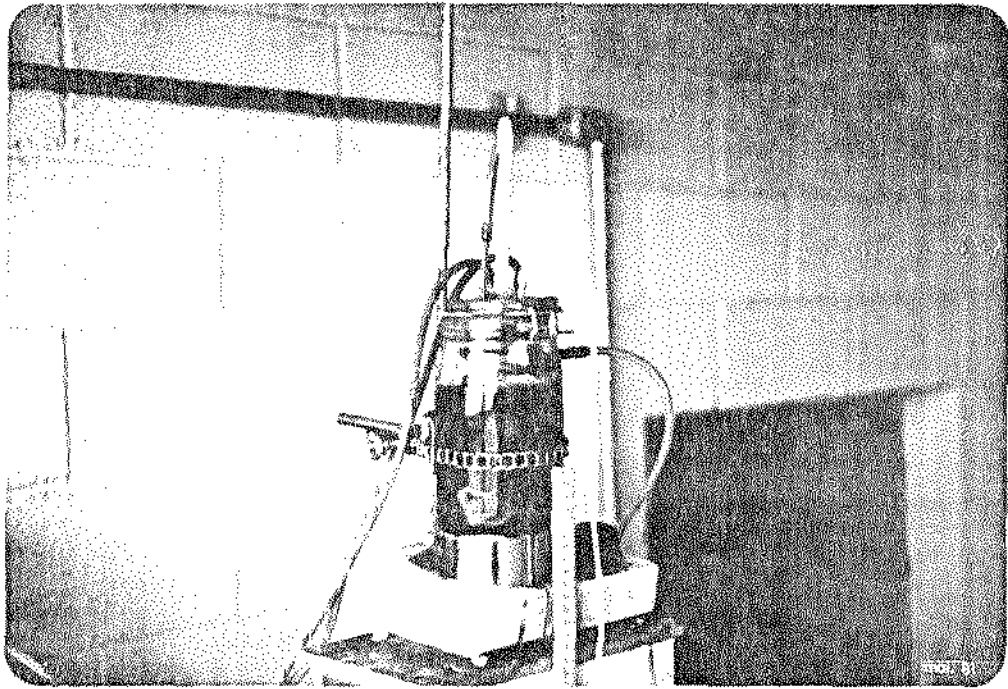


FIGURA (IV.3) - FRASCO DE MARIOTTE

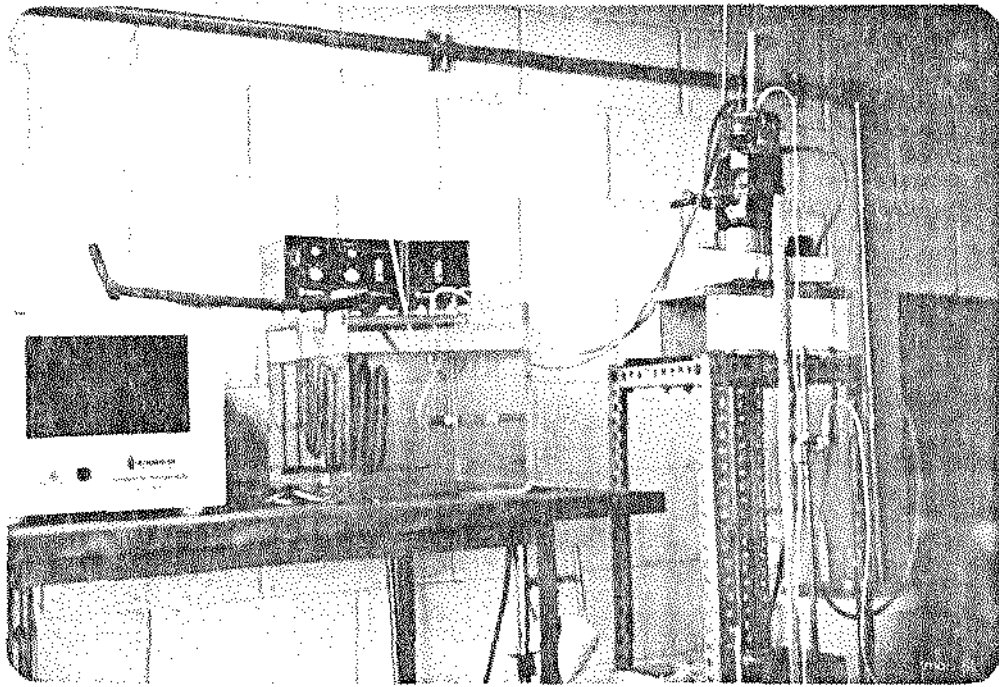


FIGURA (IV.4) - ASPECTO GERAL DO REÔMETRO CAPILAR

posteriormente de 2,71cm na seção de testes, dispendo também de um tanque de alimentação de forma cilíndrica e base cônica com volume aproximado de 500 litros e outro de amostragem de forma quadrada e base cônica com volume aproximado de 100 litros.

Na seção de testes foram instalados visores transparentes de maneira a permitir a visualização do escoamento da mistura. O comprimento total da seção de testes é de 3 metros e as tomadas de pressão localizadas de maneira a garantir a inexistência do efeito de entrada. As quedas de pressão foram medidas no trecho horizontal do circuito com manômetros de tubos em U de vidro contendo mercúrio ou tetracloreto de carbono como fluidos manométricos.

A circulação da suspensão ao longo do sistema fechado foi realizado por uma bomba centrífuga de rotor aberto de 5HP de potência do tipo auto-escorvante e fabricado por bombas MARK, fornecendo uma boa uniformidade ao longo da tubulação sem ser necessário um sistema de agitação externo no tanque principal (alimentação).

A vazão foi medida com o desvio periódico do fluxo do tanque principal para o de amostragem, previamente calibrado e de paredes translúcida permitindo o controle do volume. A conexão entre os dois tanques é feita de modo que a mistura amostrada possa ser succionada pela bomba após medido o volume, através da abertura da válvula situada na saída do tanque de amostragem. Um sistema de reciclo permite o controle da vazão no sistema de tubulações.

Testes contínuos de concentração foram realizados à medida que cada ponto experimental era tomado, obtendo-se desse modo, a concentração volumétrica  $C_v$ , além dos valores de  $Q$ , vazão volumétrica, e  $\Delta P$  queda de pressão, a uma determinada temperatura. As Figuras (IV.5), (IV.6) e (IV.7) mostram aspectos gerais da montagem do piloto.

### IV.3. CARACTERIZAÇÃO DA PARTÍCULA E DAS SUSPENSÕES

Junto com a amostra de concentrado de Hematita a SAMARCO MINERAÇÃO S.A. forneceram também a sua especificação industrial a qual é apresentada na Tabela (IV.1).

A densidade do sólido,  $\rho_s = 4.9 \text{ g/cm}^3$  foi determinada

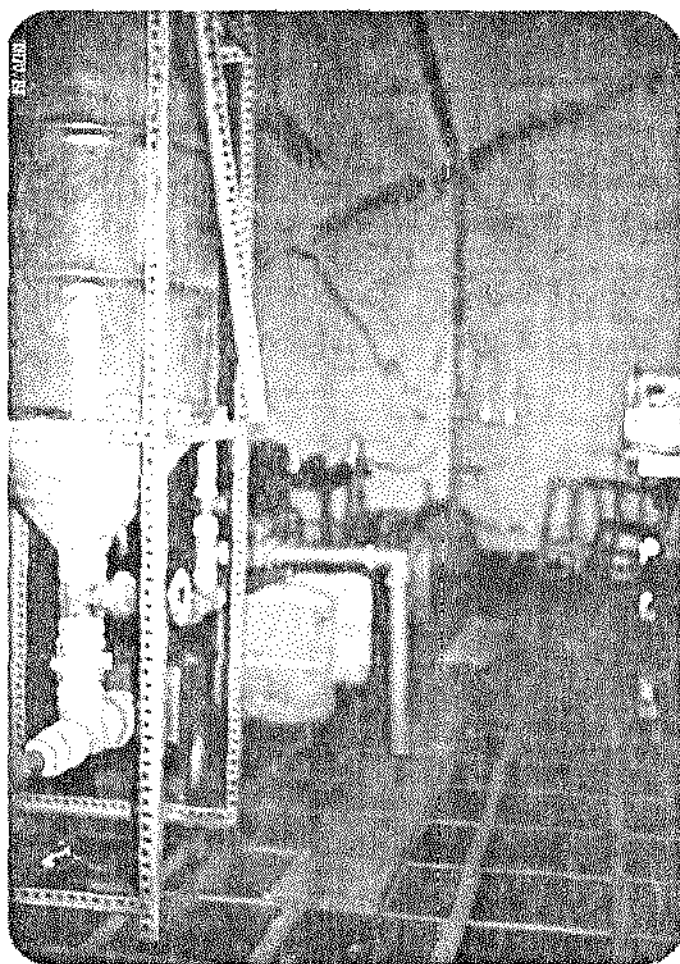


FIGURA (IV.5) - ASPECTO GERAL DA  
MONTAGEM PILOTO

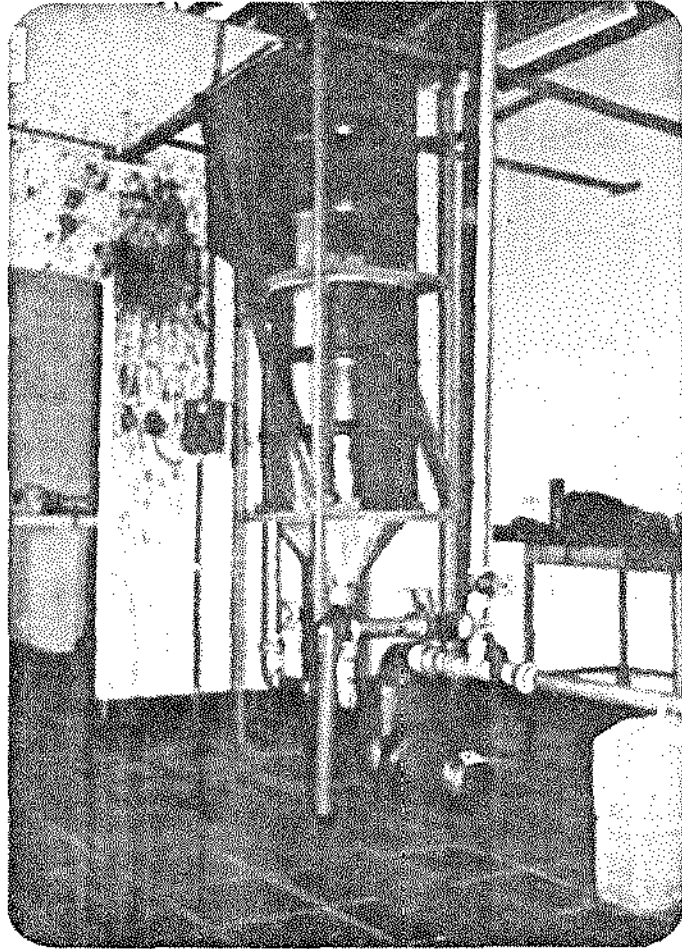


FIGURA (IV.6) - TANQUE DE ALIMENTAÇÃO  
E DE AMOSTRAGEM

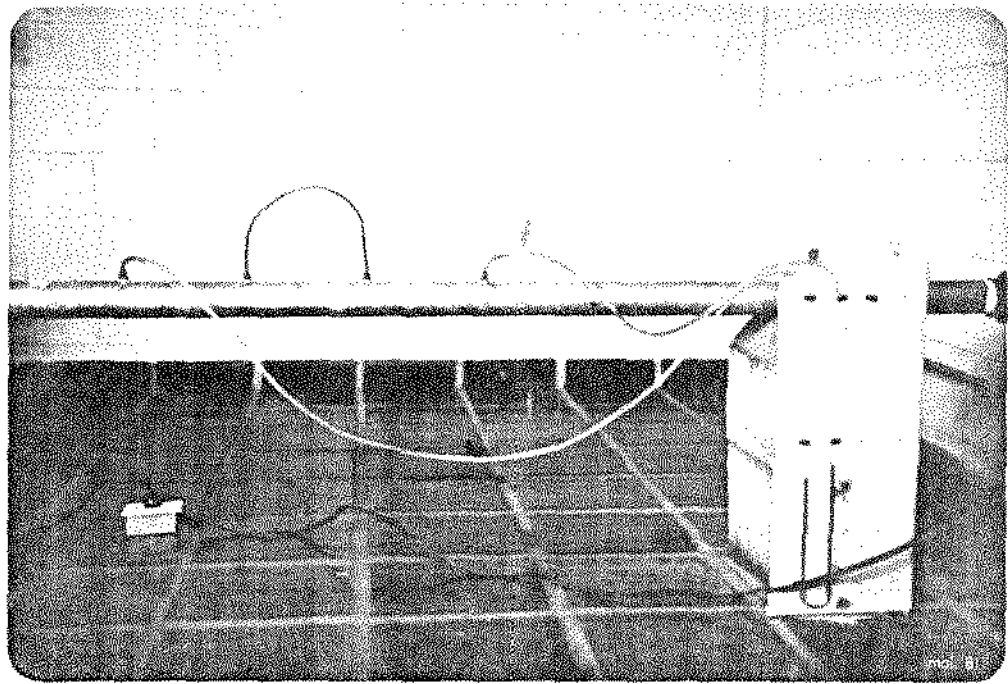


FIGURA (IV.7) - TOMADAS DE PRESSÃO

através de medidas com PICNÔMETRO. De modo a caracterizar as partículas de modo mais científico, foram obtidas as distribuições granulométricas com cicloclassificador ( $\% < d_{st}$  versus  $d_{st}$ ), Tabela (IV.2); e contador COULTER ( $\% < d_p$  versus  $d_p$ ), Tabela (IV.3). Nessas Tabelas tem-se que :

$d_p$  = Diâmetro da esfera de igual volume que a partícula

$d_{st}$  = Diâmetro da esfera que tem o mesmo comportamento dinâmico da partícula no movimento lento.

As análises granulométricas das amostras obedecem a função distribuição de *Rosin-Rammler & Bennet*. O cálculo do diâmetro médio de *Sauter*,  $\bar{D}$ , está associado a esta função distribuição e os resultados são mostrados na Tabela (IV.4) e sua definição no Apêndice A.

As suspensões utilizadas nas medidas foram preparadas efetuando-se a mistura do minério com água em várias proporções de modo a cobrir faixas de concentração de 25% a 75% em peso.

TABELA (IV.1) - ESPECIFICAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO\*

área específica	1681 cm <sup>2</sup> /g
SiO <sub>2</sub>	0,86%
Fe	67,48%
umidade	< 10%
pH	9,6
+ 200 Mesh	0,55%
+ 325 Mesh	93,15%

\* FONTE - SAMARCO

TABELA (IV.2) - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (CICLOCLASSIFICADOR)

TESTE Nº 1

x < d <sub>st</sub>	d <sub>st</sub> (μ <sub>m</sub> )
63,50	24,1
43,2	17,1
27,4	12,9
19,1	9,1
15,4	6,7

TESTE Nº 2

x < d <sub>st</sub>	d <sub>st</sub> (μ <sub>m</sub> )
82,1	28,5
53,1	20,9
32,9	15,2
21,7	10,7
16,4	7,9



TABELA (IV.3) - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (CONTADOR COULTER,  
TUBO 200  $\mu_m$ )

$x < d_p$	$d_p$ ( $\mu_m$ )
3,8	3,12
6,7	3,93
9,4	4,95
12,5	6,24
17,8	7,86
24,1	9,90
32,0	12,50
41,5	15,70
56,2	19,80
69,5	25,00
82,6	31,50
93,6	39,60
98,5	49,90
99,6	62,90

TABELA (IV.4) - RESULTADOS DO DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER ASSOCIADO  
A DISTRIBUIÇÃO DE ROSIN-RAMMLER-BENNET PARA A HE  
MATITA.

EQUIPAMENTO	$n_o$	$D'$ ( $\mu_m$ )	$\bar{D}$ ( $\mu_m$ )
CICLOCLASSIFICADOR	1,57	23,4	9,6
CONTADOR COULTER	1,70	21,38	10,0

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS

#### V.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### V.1.1. REGIME LAMINAR

Usando o reômetro capilar anteriormente descrito, a relação entre a taxa de deformação,  $\lambda$  e a tensão cisalhante  $S_w$ , (equação III.3) foi estabelecida através de medidas da vazão mássica no tubo capilar  $W$ , para diferentes desníveis do sistema  $H$  com o uso das equações (III.4) e (III.5):

$$S_w = \frac{D \Delta P}{4L} = \frac{D \rho gH}{4L}$$

e

$$Y = \frac{8v}{D} = \frac{32 W}{\pi \rho D^3}$$

onde:

$$\Delta P = H \rho g = \text{queda de pressão piezométrica}$$

Foram realizadas um total de 365 medidas experimentais com suspensões de Hematita de concentrações em peso na faixa de 25% a 75% com intervalos de 10% e nas temperaturas constantes de 20°C, 30°C e 40°C para várias relações de  $L/D$ . Estes resultados são mostrados nas Figuras (V.1), (V.2) e (V.3) onde num gráfico aritmético o modelo *Bingham* é caracterizado, e nas Figuras (V.4), (V.5) e (V.6) onde num gráfico logarítmico o modelo de *Ostwald-de Waele* é evidenciado. Esses gráficos foram construídos para cada temperatura constante e tendo  $C_w$  como parâmetro.

##### V.1.2. REGIME TURBULENTO

Na instalação piloto também anteriormente descrita foram realizadas 73 determinações experimentais com suspensões de Hematita de concentrações em peso de 40%, 50% e 65% em temperaturas medidas que oscilaram em torno de 30°C.

Estes resultados são mostrados nas Figuras (V.7), (V.8)

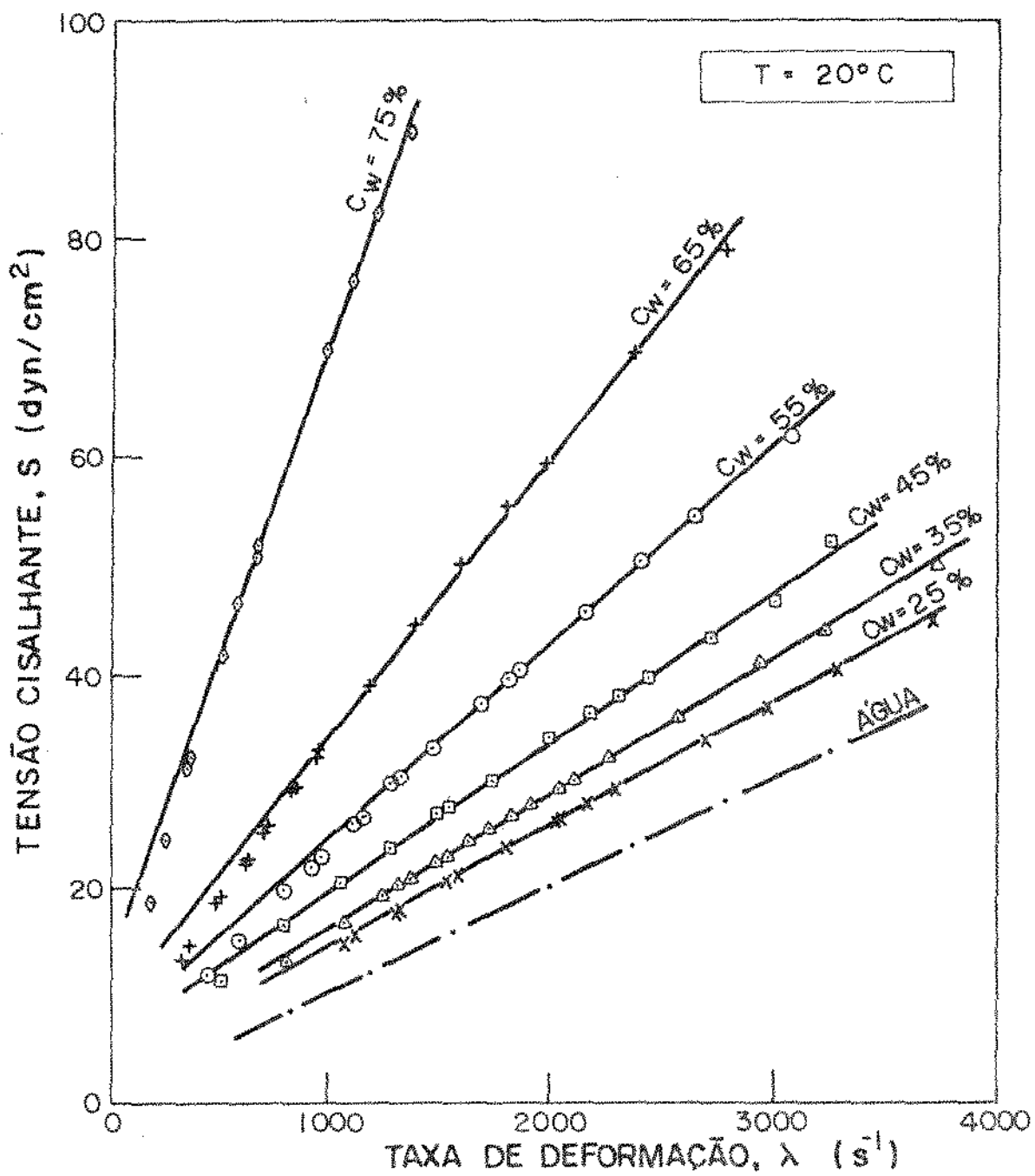


FIGURA.V. 1-CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUIDO DE BINGHAM).

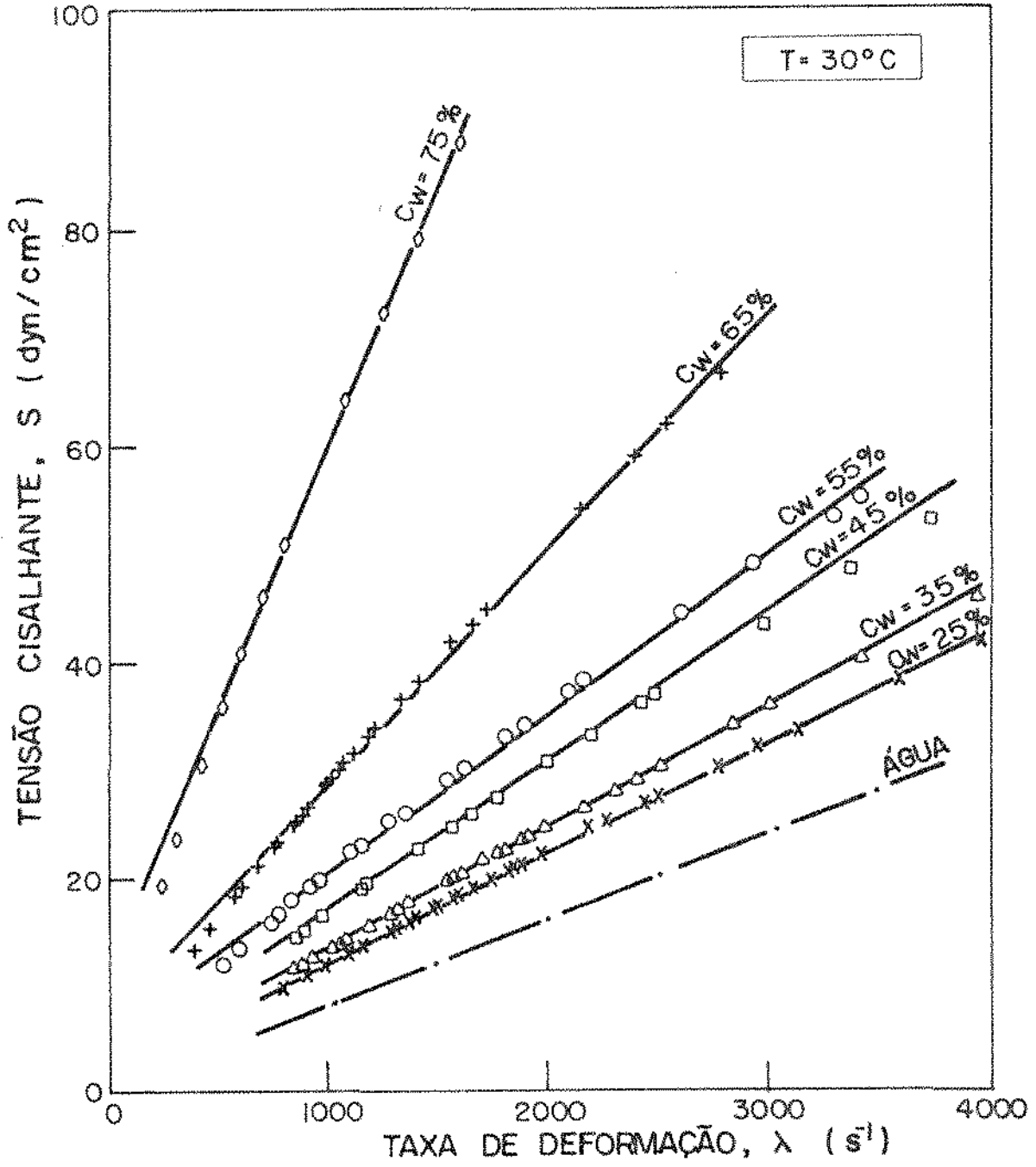


FIGURA.V.2 — CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUIDO DE BINGHAM).

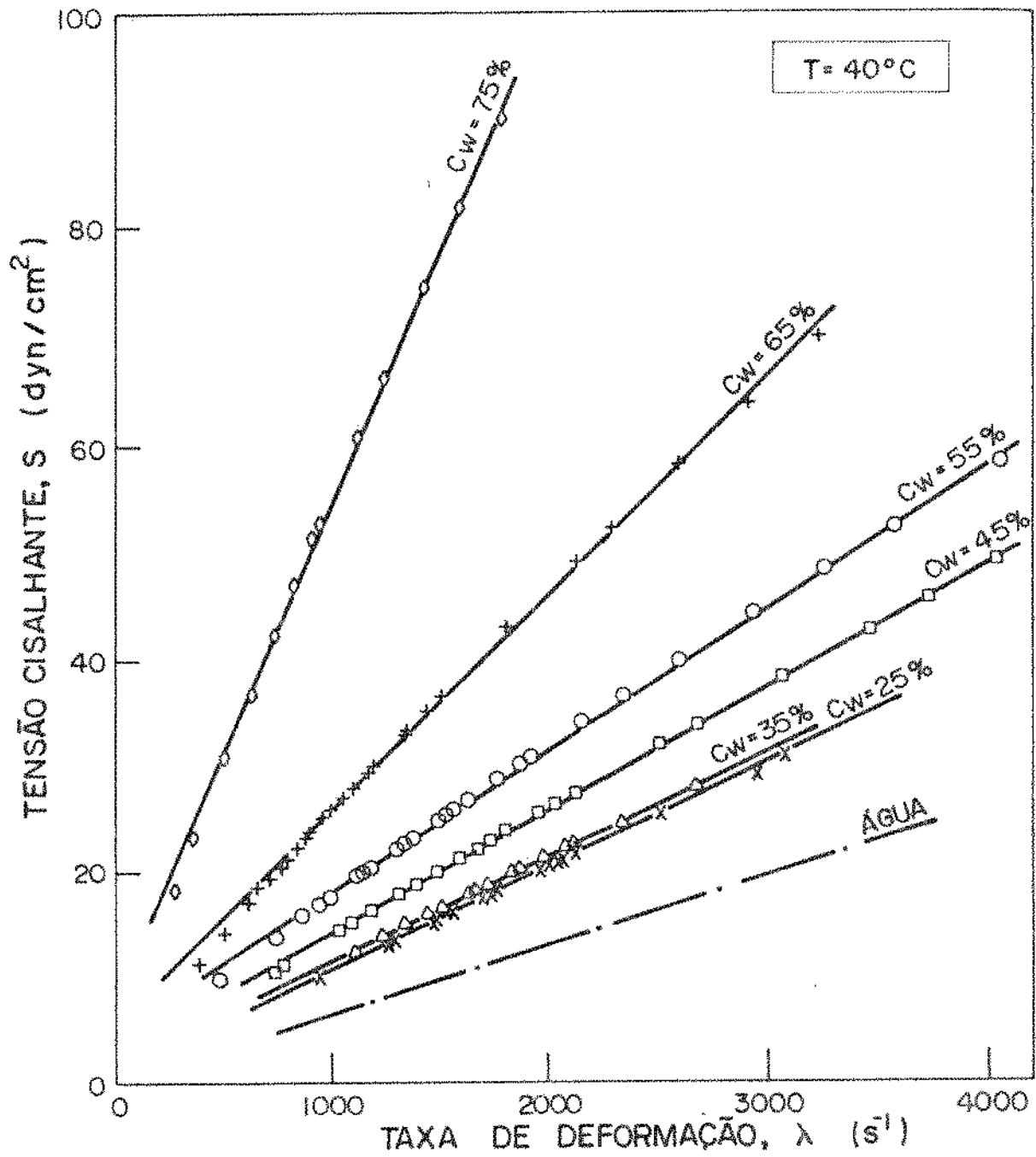


FIGURA.V.3 - CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUIDO DE BINGHAM).

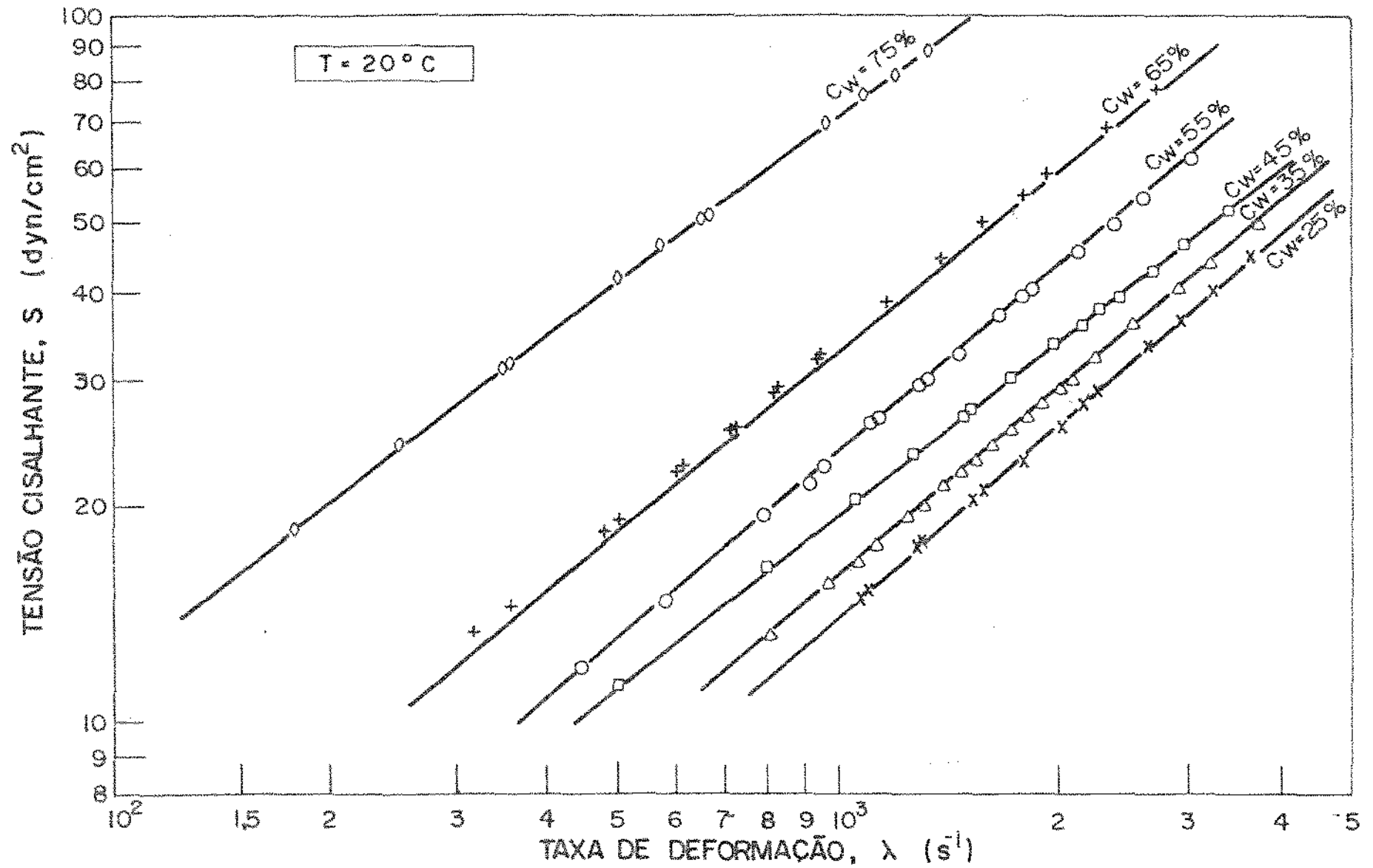


FIGURA.V.4 - CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUIDO PSEUDO PLÁSTICO).

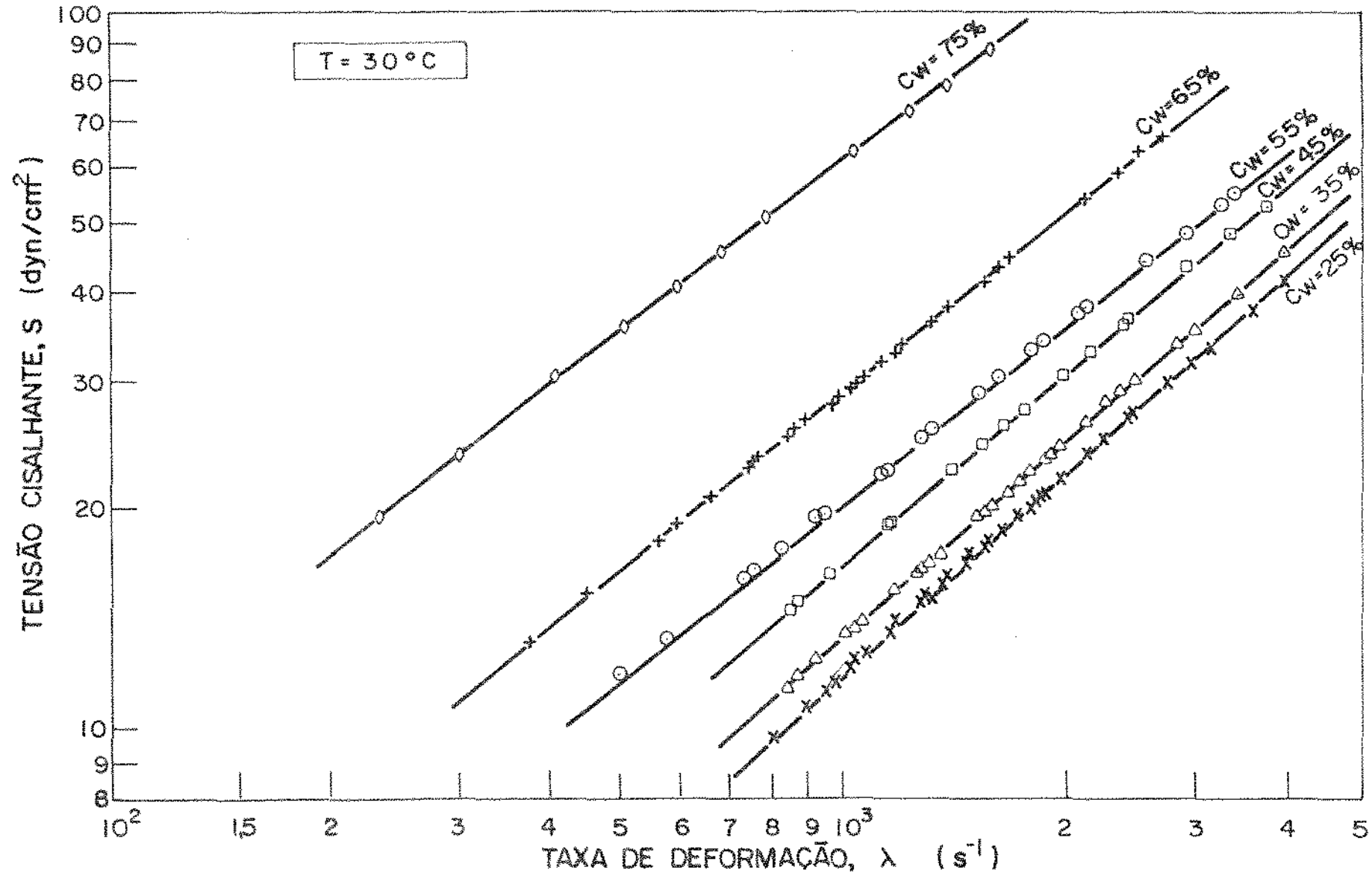


FIGURA.V.5 - CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUIDO PSEUDO PLÁSTICO).

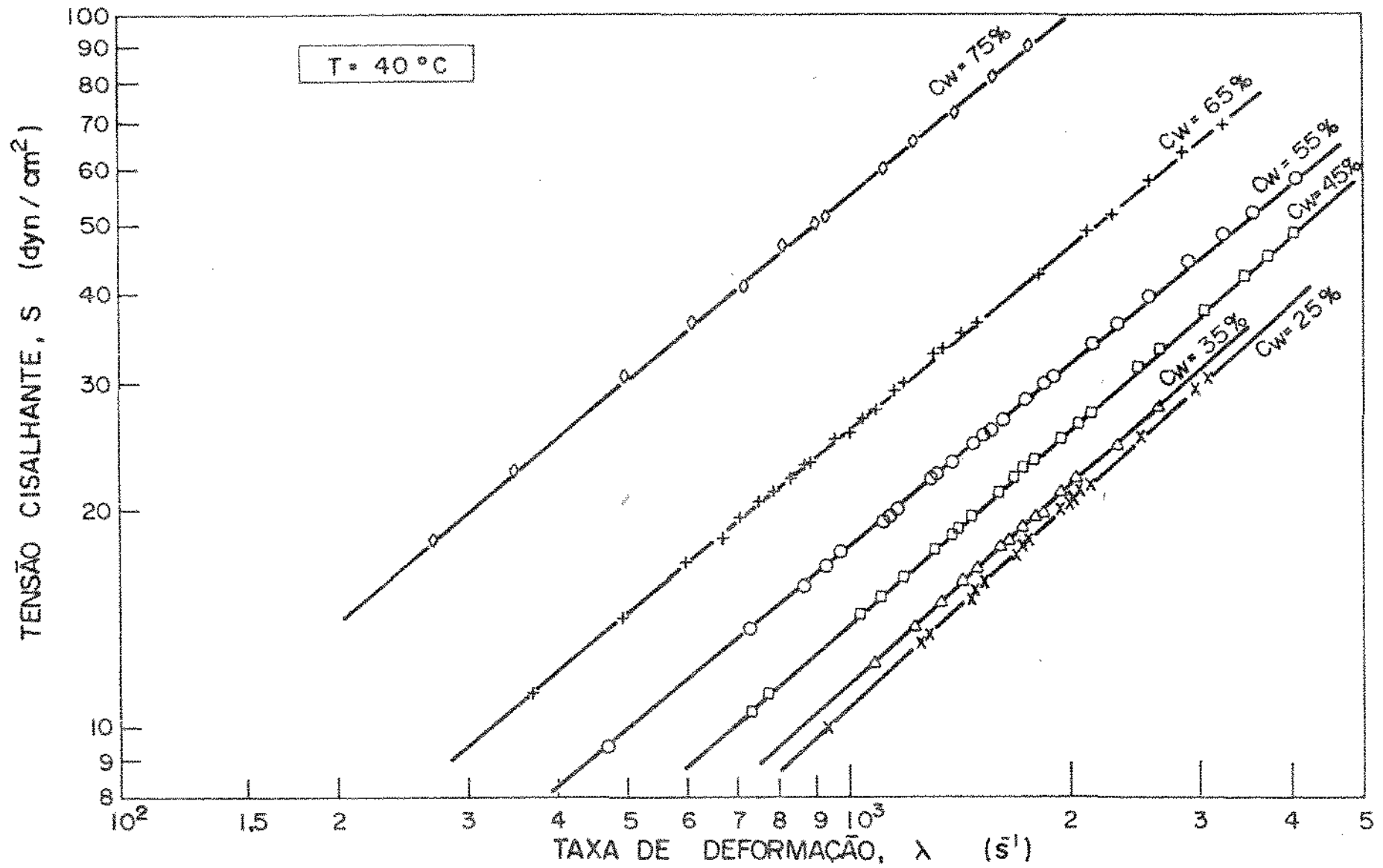


FIGURA V.6 — CURVAS REOLÓGICAS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO (MODELO DE FLUÍDO PSEUDO PLÁSTICO).



e (V.9) sob a forma de um gráfico logaritimico de  $(\frac{D}{4L} \Delta P)$  contra  $(\frac{8v}{D})$  para  $C_w$  constante e tendo D como parâmetro.

Nas Tabelas do Apêndice B encontram-se listados todos os dados obtidos apresentando para cada determinação experimental valores de Q,  $\Delta P$ ,  $(\frac{D}{4L} \Delta P)$  e  $(\frac{8v}{D})$ .

## V.2. RESULTADOS CALCULADOS

### V.2.1. PARÂMETROS REOLÓGICOS

Devido ao bom ajuste dos dados viscométricos no regime laminar aos modelos de Bingham, equação (II.2) e Ostwald-de Waele, equação (II.1), os parâmetros  $S_0$ ,  $\eta$ , K e n foram calculados para a temperatura e concentração da experiência, os quais são mostrados nas Tabelas (V.1), (V.2) e (V.3) e com os quais foram construídos os gráficos (V.10), (V.11), (V.12) e (V.13).

### V.2.2. ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE TRANSIÇÃO

Como todas as medidas experimentais realizadas na unidade piloto foram feitas com velocidades suficientemente altas de forma a garantir a turbulência, não foi possível a obtenção de dados para a determinação da velocidade de transição. Assim sendo neste trabalho nós nos limitamos somente a estimativa de  $v_T$  com uso de algumas correlações existentes na literatura e que são mostrados na Tabela (V.4). Esses valores servem como referência para a verificação dos níveis de velocidade obtidos no escoamento turbulento das suspensões.

### V.2.3. MÉTODO DE BOWEN

A determinação das constantes, A, w e x da correlação de Bowen, dada pela equação (III.39) requer dados de queda de pressão contra vazão com no mínimo dois diâmetros diferentes de tubos no escoamento turbulento. Esses dados foram obtidos na instalação piloto para 3 diferentes concentrações.

Sabendo-se que para diferentes diâmetros de tubos a inclinação das linhas na região turbulenta para um dado fluido são praticamente iguais, com os dados de  $(\frac{D}{4L} \Delta P)$  contra  $(\frac{8v}{D})$  em

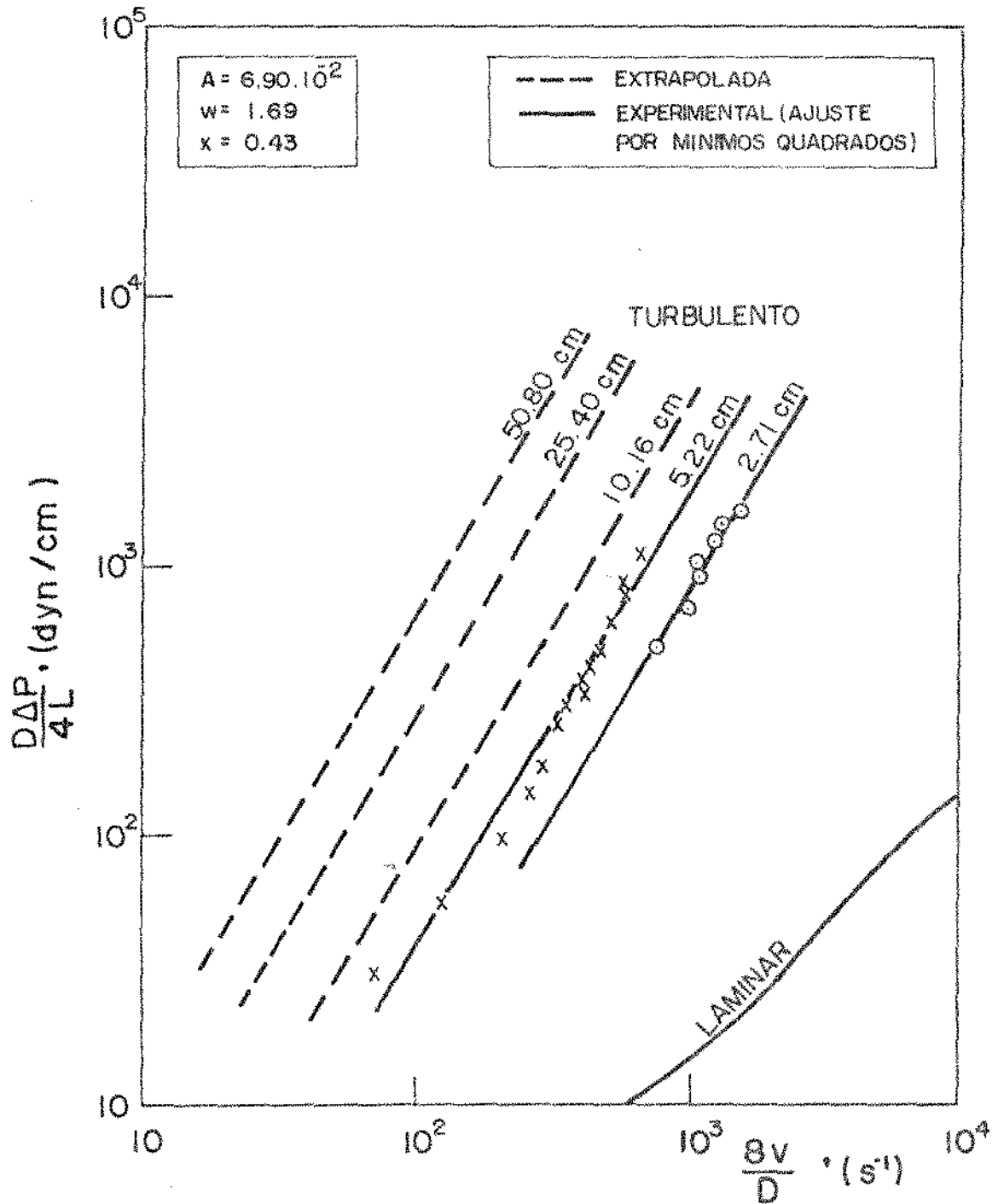


FIGURA V.7 — DIAGRAMA DE ESCOAMENTO PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO COM  $C_w = 40\%$ . (EXTRAPOLAÇÕES PELO MÉTODO DE BOWEN).

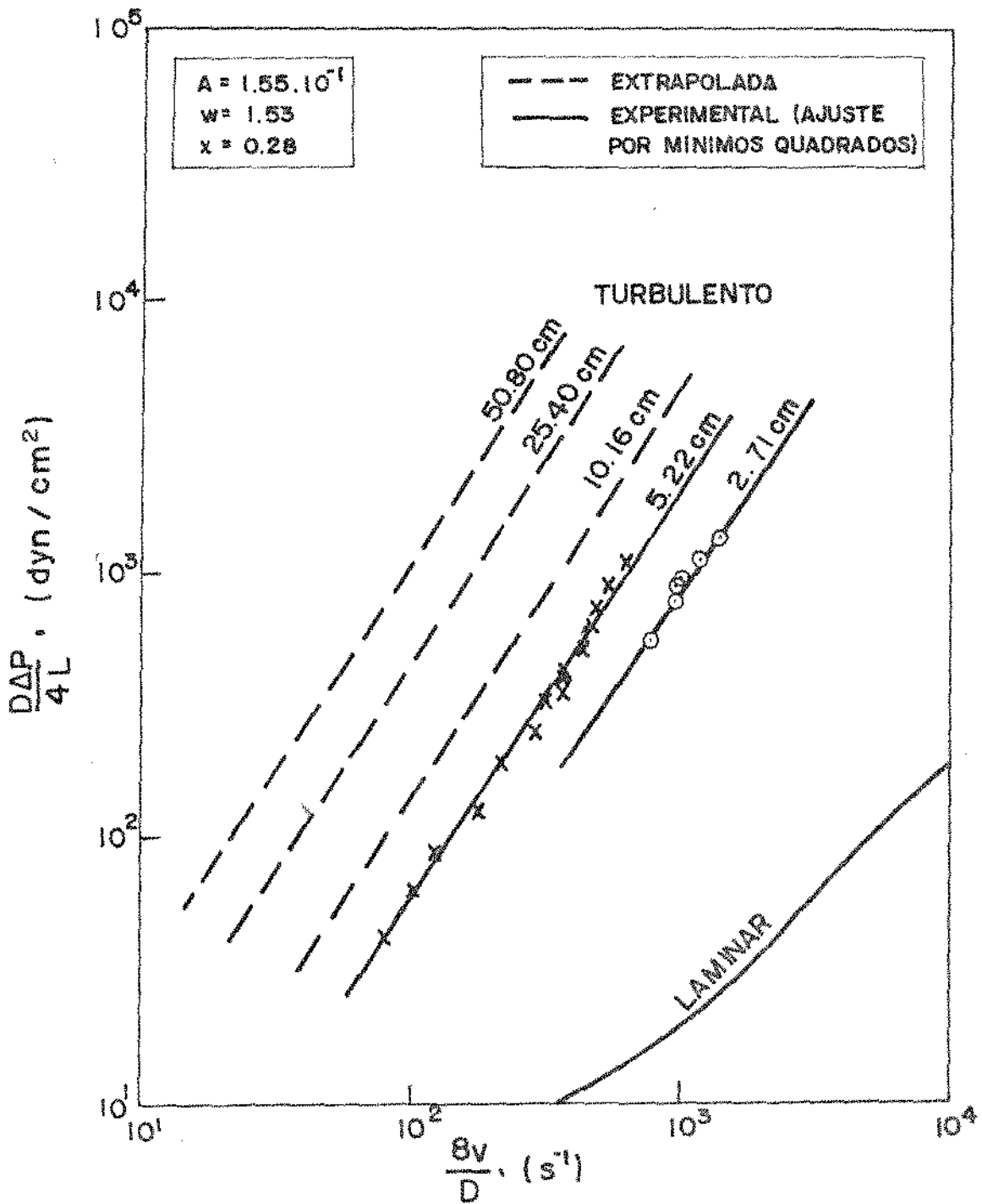


FIGURA.V.8 — DIAGRAMA DE ESCOAMENTO PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO COM  $C_w=50\%$ . (EXTRAPOLAÇÕES PELO MÉTODO DE BOWEN).

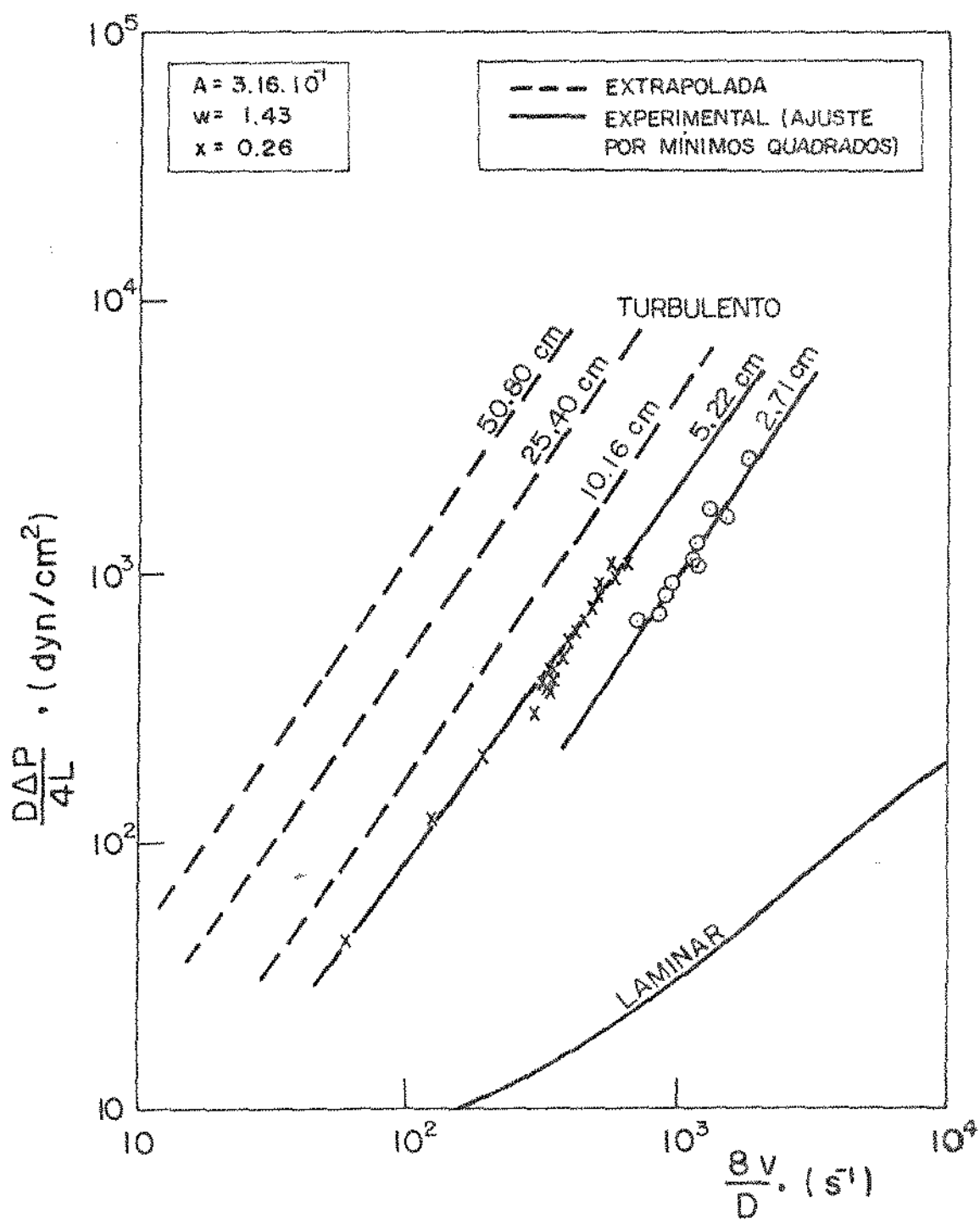


FIGURA.V.9 - DIAGRAMA DE ESCOAMENTO PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO COM  $C_w = 65\%$ . (EXTRAPOLAÇÕES PELO MÉTODO DE BOWEN).

TABELA (V.1) - PARÂMETROS REOLÓGICOS DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO A 20°C

$C_w$ (% em peso)	$S_o$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$n$ (Cp)	$K$ (dina s <sup>n</sup> /cm <sup>2</sup> )	$n$
25	2,87	1,16	0,03	0,89
35	3,62	1,27	0,04	0,87
45	5,87	1,39	0,09	0,86
55	6,34	1,84	0,12	0,83
65	8,34	2,60	0,20	0,80
75	14,12	5,69	0,33	0,78

TABELA (V.2) - PARÂMETROS REOLÓGICOS DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO  
DE FERRO A 30°C

$C_w$ (% em peso)	$S_o$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$n$ (Cp)	$K$ (dina s <sup>n</sup> /cm <sup>2</sup> )	$n$
25	1,90	1,02	0,02	0,91
35	2,36	1,12	0,03	0,90
45	3,71	1,34	0,04	0,87
55	5,71	1,48	0,08	0,86
65	7,12	2,17	0,13	0,82
75	12,39	4,78	0,28	0,78

TABELA (V.3) - PARÂMETROS REOLÓGICOS DE SUSPENSÕES DE MINÉRIO  
DE FERRO A 40°C

$C_w$ (% em peso)	$S_o$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$\eta$ (Cp)	$K$ (dina s <sup>n</sup> /cm <sup>2</sup> )	$n$
25	0,99	0,98	0,01	0,95
35	1,57	1,00	0,02	0,93
45	2,59	1,16	0,03	0,90
55	4,78	1,34	0,05	0,86
65	6,04	2,01	0,07	0,85
75	8,51	4,66	0,16	0,85

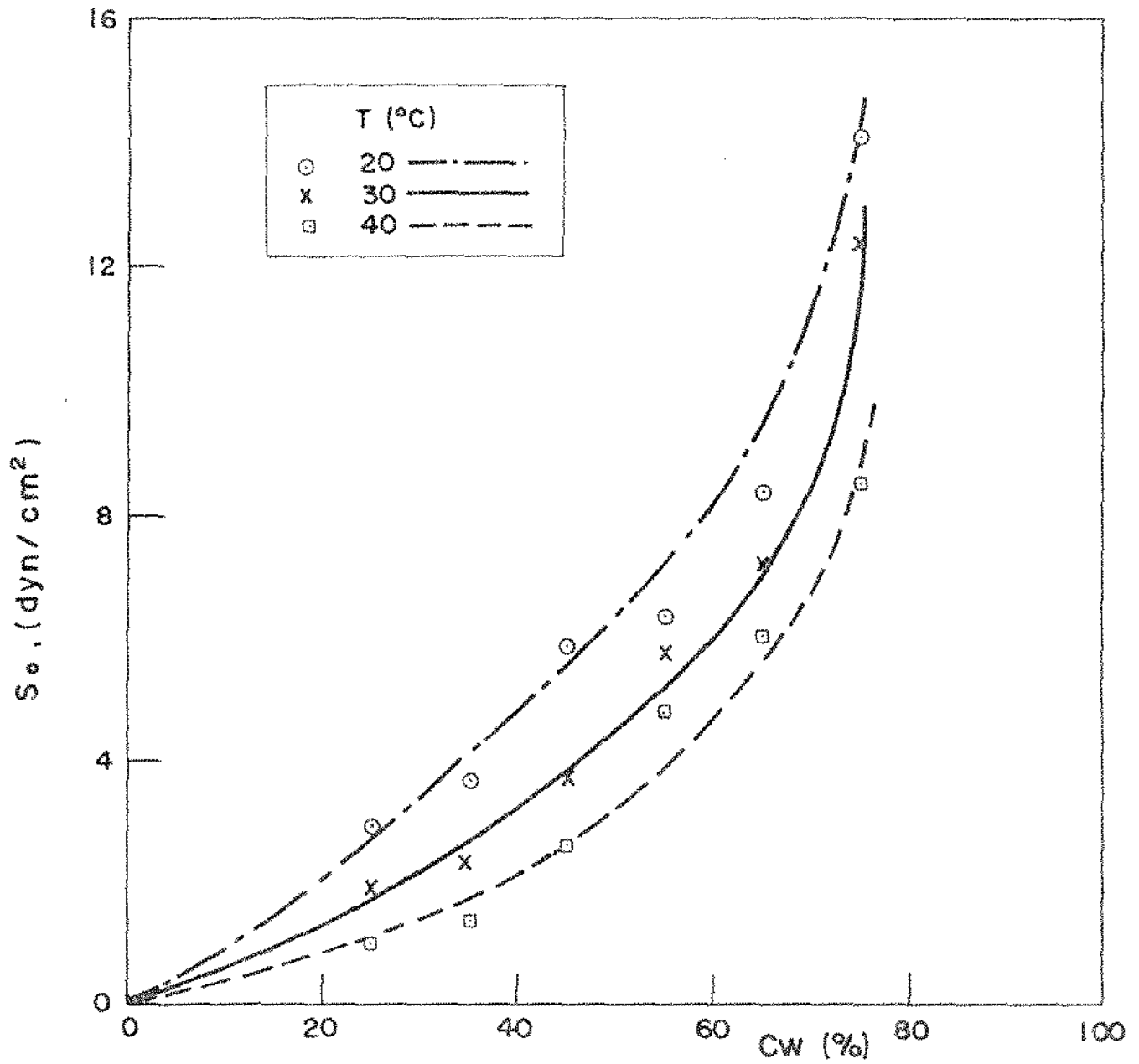
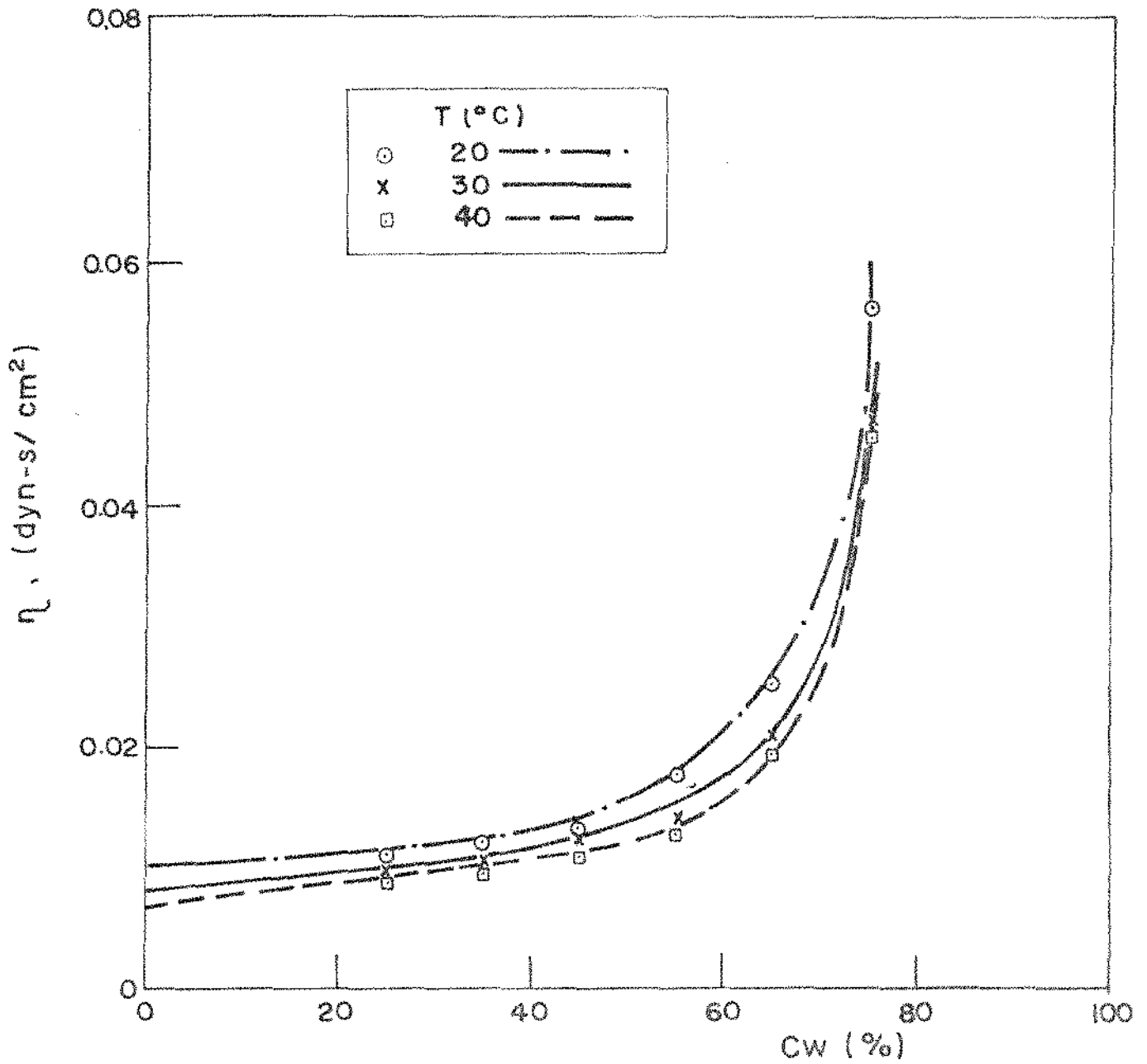


FIGURA.V.10-VARIAÇÃO DO PARAMETRO  $S_0$  COM A CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA





FIGURAV.II-VARIAÇÃO DO PARAMETRO  $\eta$  COM A CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA.

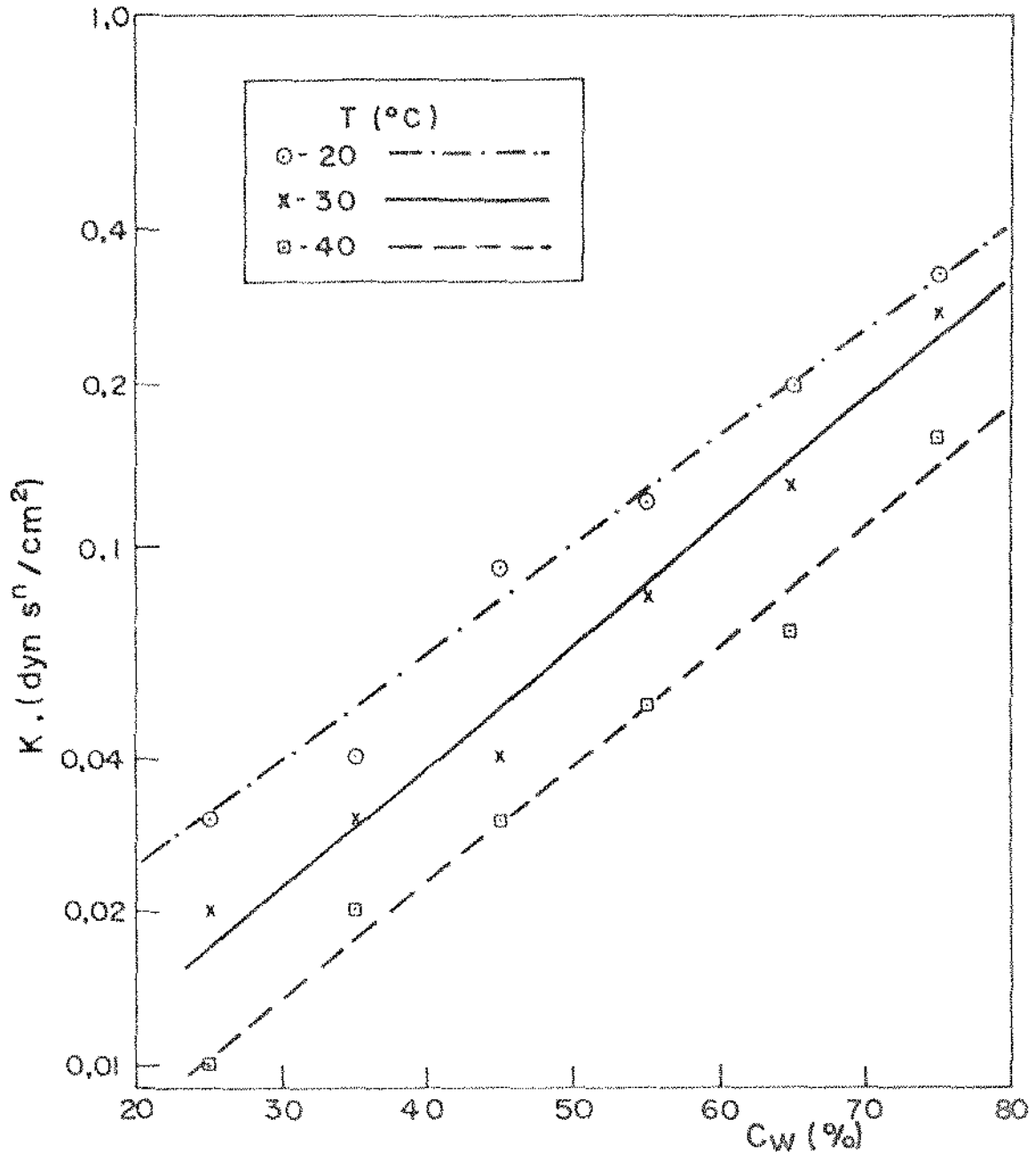


FIGURA.V.12 — VARIACÃO DO PARÂMETRO K COM A CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA.

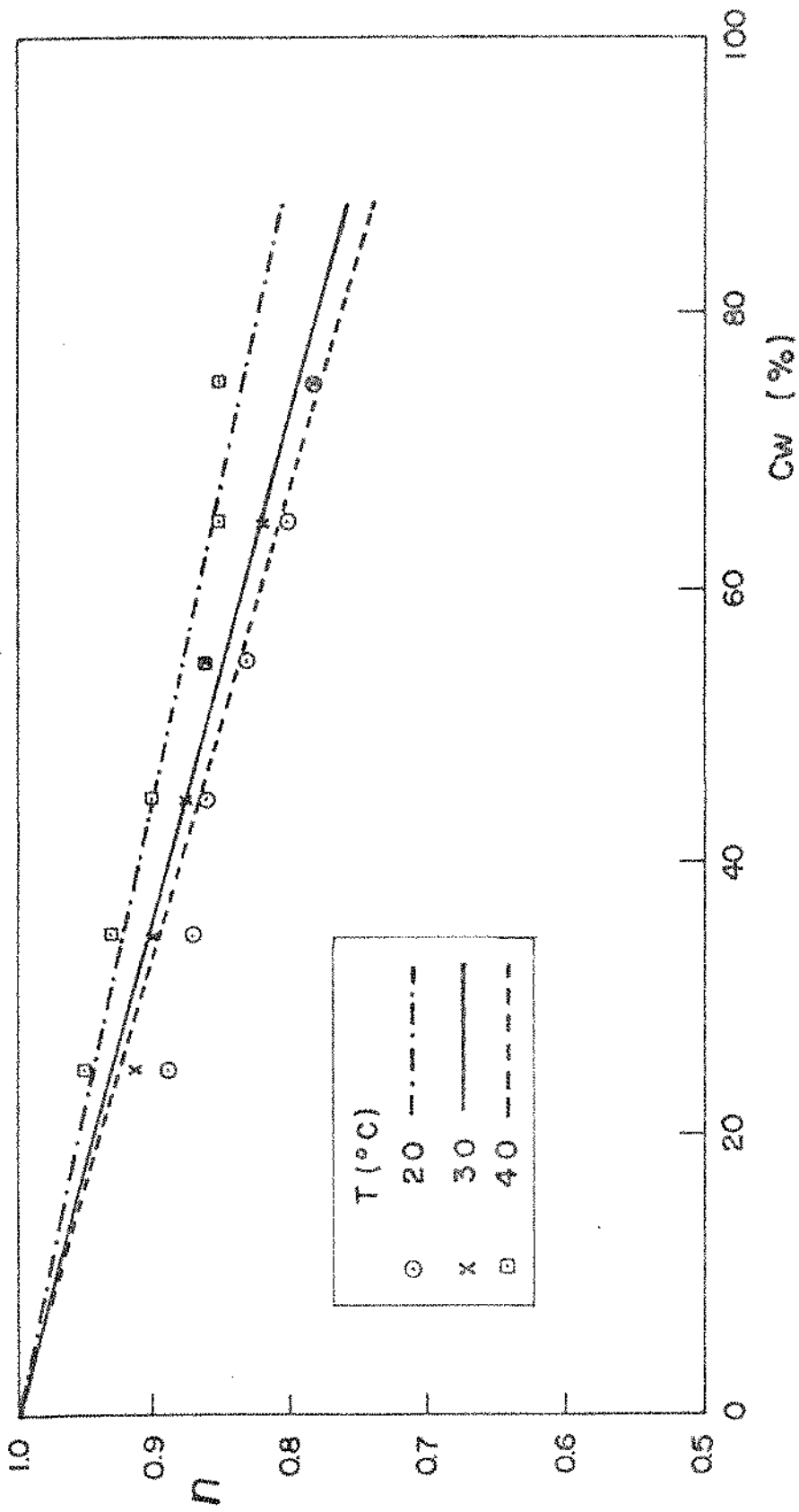


FIGURA V.13 — VARIÇÃO DO PARÂMETRO  $\eta$  COM A CONCENTRAÇÃO E A TEMPERATURA.

TABELA (V.4) - VALORES DA VELOCIDADE DE TRANSIÇÃO PREVISTA PELAS  
CORRELAÇÕES

$V_T$ (cm/s) COM DIÂMO DE 2,71 cm					
$C_w$ (%)	<i>Sinclair</i> Eq. (III.28)	<i>Spells</i> Eq. (III.27)	<i>Spells</i> Eq. (III.26)	<i>Thomas</i> Eq. (III.19)	<i>Durand</i> Eq. (III.21)
40	77,24	46,37	19,16	26,08 a 45,18	29,16
50	77,24	50,08	20,70	29,62 a 51,31	32,80
65	77,24	57,59	23,80	33,86 a 58,65	37,95

$V_T$ (cm/s) COM DIÂMO DE 5,22 cm					
$C_w$ (%)	<i>Sinclair</i> Eq. (III.28)	<i>Spells</i> Eq. (III.27)	<i>Spells</i> Eq. (III.26)	<i>Thomas</i> Eq. (III.19)	<i>Durand</i> Eq. (III.21)
40	77,24	70,21	29,01	26,08 a 45,18	23,08
50	77,24	75,82	31,33	29,62 a 51,33	25,05
65	77,24	87,18	36,03	33,86 a 58,65	35,93

um gráfico logaritimico para os diâmetros de 5,22cm e 2,71cm obteve-se um par de linhas paralelas com inclinação  $w$  que são mostrados nas Figuras (V.7), (V.8) e (V.9). Essas Figuras têm ainda a importante característica de indicar as faixas dos valores de  $S_w$  e de  $Y$  obtidos nas experiências realizadas com os dois regimes de escoamento.

A determinação do expoente  $x$  foi feito efetuando-se o cálculo do valor médio de  $(\frac{\Delta P}{v^w L})$  para cada diâmetro de tubo. Num gráfico deste valor contra  $D$  em coordenadas logaritimicas obteve-se uma linha reta cuja inclinação é  $-(1+x)$ .

A constante  $A$  foi determinada da equação (III.39) sendo conhecido os valores de  $x$  e  $w$ , ou seja é a interseção no gráfico logaritimico de  $\frac{D \Delta P}{4L}$  contra  $v$  quando  $v = 1$ .

Na Figura (V.14) temos a correlação dos dados turbulentos para uma determinada concentração e diferentes diâmetros com as constantes de *Bowen* correspondentes.

De posse dos valores das constantes foram feitas extrapolações para diâmetros de 10,16cm, 25,40cm e 50,80cm, sendo esses resultados também apresentados nas Figuras (V.7), (V.8) e (V.9).

A variação de  $A$ ,  $w$  e  $x$  com a concentração é dada respectivamente pelas expressões:

$$A = 0,995 C_w - 0,334 \quad (V.1)$$

$$w = 1,226 C_w - 0,342 \quad (V.2)$$

$$x = 1,030 - 1,5 C_w \quad \text{para } C_w \leq 0,5 \quad (V.3a)$$

$$x = 0,347 - 0,133 C_w \quad \text{para } C_w \geq 0,5 \quad (V.3b)$$

#### V.2.4. FATOR DE ATRITO NO ESCOAMENTO TURBULENTO

Com os dados experimentais de  $v$  e  $\Delta P/L$  o fator de atrito experimental foi determinado definido pela equação (III.12).

$$f = D \Delta P / 2 \rho v^2 L$$

e comparado com o fator de atrito calculado pelas correlações das várias tendências já discutidas no parágrafo III.3, associadas a um determinado Número de *Reynolds*.

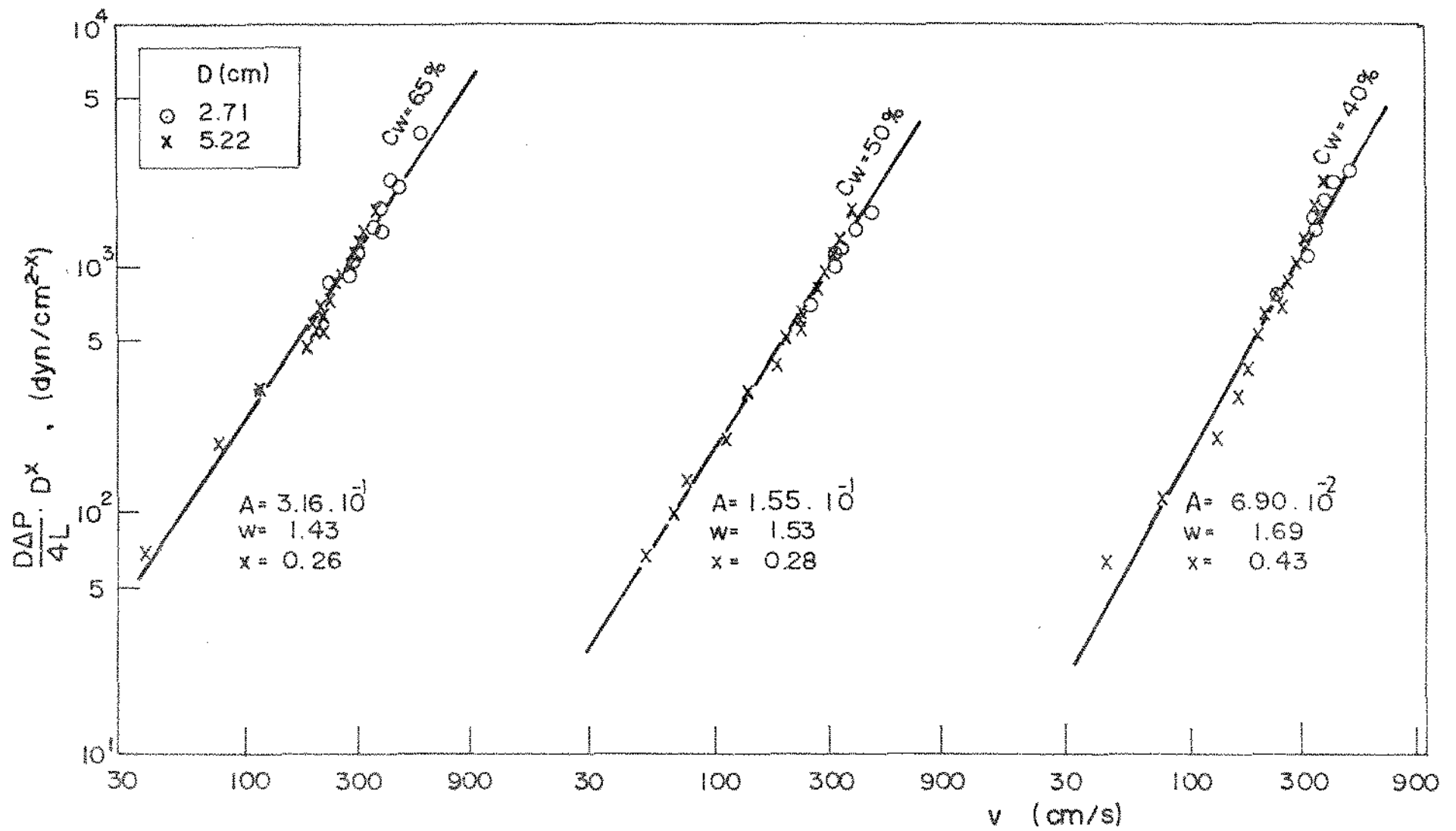


FIGURA V.14 - CORRELAÇÃO DOS DADOS TURBULENTOS PARA SUSPENSÕES DE MINÉRIO DE FERRO.

Na Tabela (V.5) são apresentados para os 73 pontos experimentais de cada combinação de  $f - Re$  a média aritmética dos valores de  $(f \text{ exp.}/f \text{ calc.})_i$ , ou seja:

$$\left( \frac{f \text{ exp.}}{f \text{ calc.}} \right)_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{f \text{ exp.}}{f \text{ calc.}} \right)_i \quad (\text{V.4})$$

bem como o desvio m\u00e9dio quadr\u00e1tico em rela\u00e7\u00e3o a  $(f \text{ exp.}/f \text{ calc.})_{\text{m\u00e9dio}}$ :

$$S = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{f \text{ exp.}}{f \text{ calc.}} \right)_i - \left( \frac{f \text{ exp.}}{f \text{ calc.}} \right)_{\text{m\u00e9dio}} \right]^2}{N - 1} \right\}^{1/2} \quad (\text{V.5})$$

Embora o resultado indicado pela utiliza\u00e7\u00e3o do m\u00e9todo de Bowen seja trivial devido ao ajuste dos par\u00e2metros com os mesmos dados, foi inclu\u00eddo o mesmo na Tabela (V.5) apenas como uma refer\u00eancia para os outros m\u00e9todos.

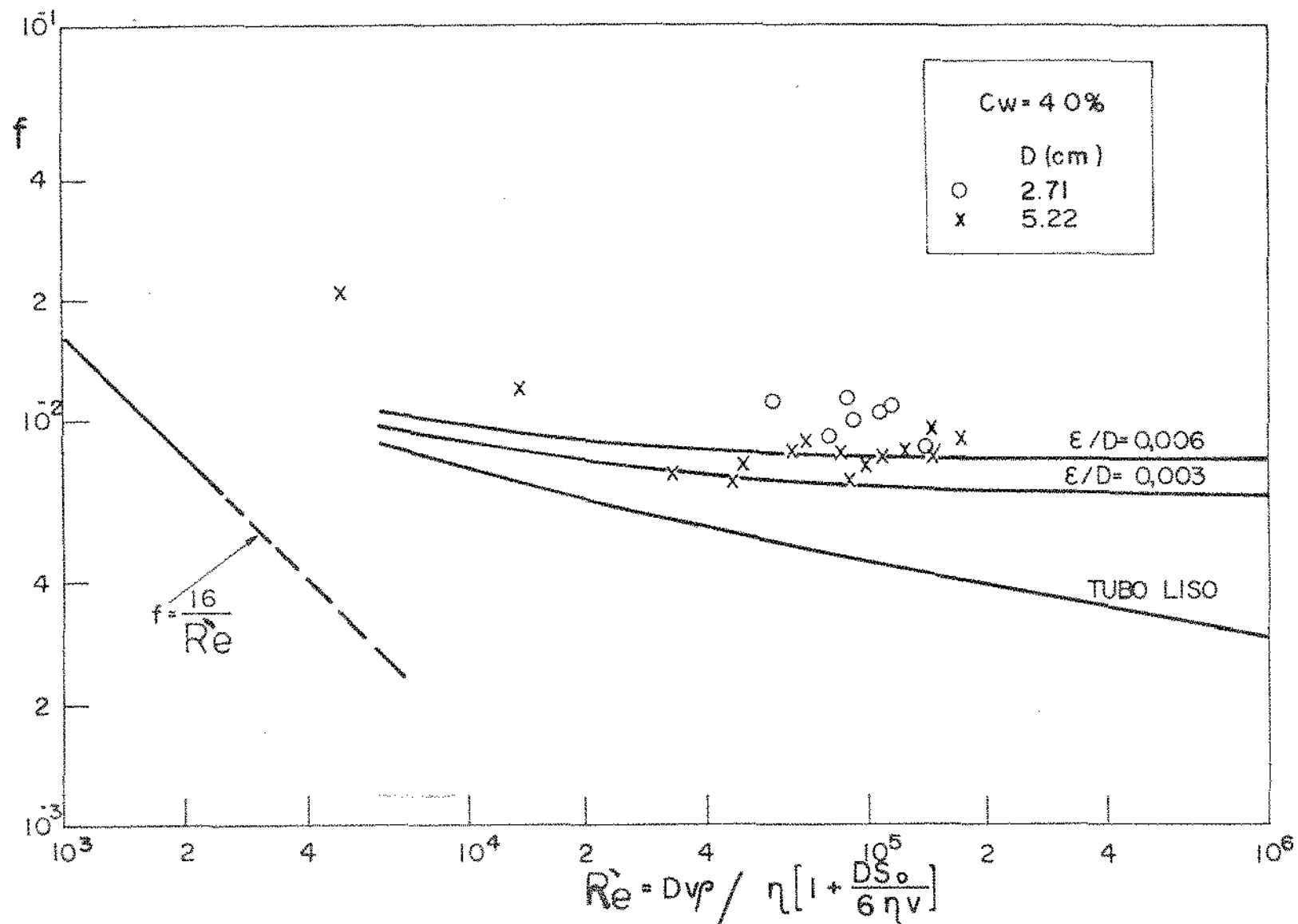
No ap\u00eandice C est\u00e3o listados valores de  $f \text{ exp.}$ ,  $Re$ ,  $f \text{ calc.}$  e a rela\u00e7\u00e3o  $f \text{ exp.}/f \text{ calc.}$  para cada determina\u00e7\u00e3o experimental.

Nas Figuras (V.15, (V.16) e (V.17) apresenta-se os gr\u00e1ficos logaritimicos do fator de atrito em fun\u00e7\u00e3o do N\u00famero de Reynolds modificado definidos respectivamente pelas equa\u00e7\u00f5es (III.32) e (III.20) e comparados com o fator de atrito experimental.

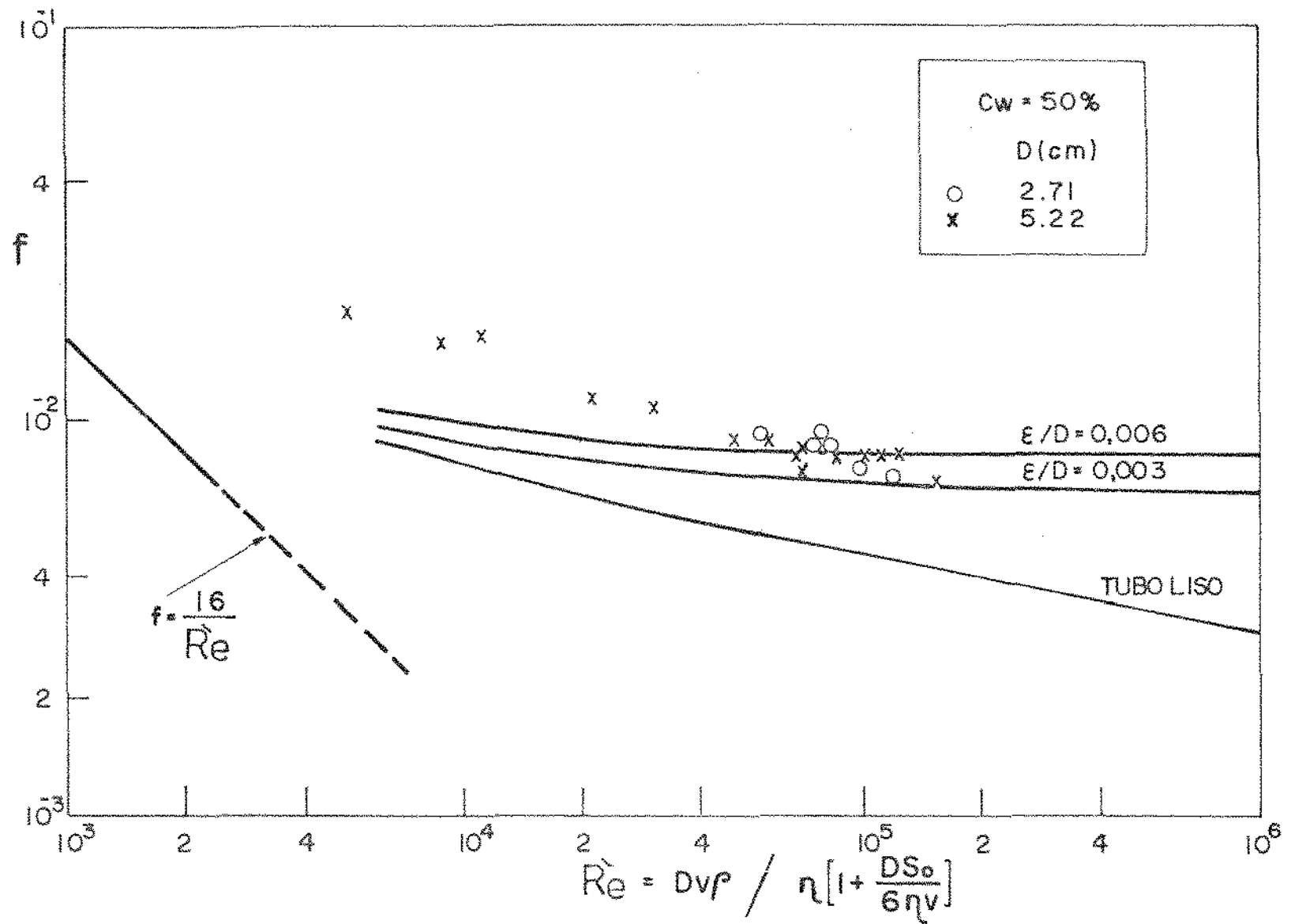
TABELA (V.5) - RESUMO DOS RESULTADOS DAS COMBINAÇÕES DE  $f$  -  $Re$   
TESTADAS NESTE TRABALHO

MÉTODO		$\left[ \frac{f \text{ exp.}}{f \text{ calc.}} \right]$ médio	S
FATOR DE ATRITO ( $f$ )	NÚMERO DE REYNOLDS		
Eq.(III.32)	$Re^*$ Eq.(III.10)	1,17	0,17
Eq.(III.32)	$Re'$ Eq.(III.20)	1,13	0,15
Eq.(III.40)	$Re_B$ Eq.(III.41)	1,00	0,13
Eq.(III.44)	$Re_{M.R.}$ Eq.(III.16)	2,11	0,40
Eq.(III.36)	$Re^*$ Eq.(III.10)	2,26	0,51
Eq.(III.38)	$Re_{S.M.}$ Eq.(III.14)	2,67	0,41





FIGURAV.15-FATOR DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO PARA SUSPENSÃO DE MINÉRIO DE FERRO.



FIGURAV.16 - FATOR DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO PARA SUSPENSÃO DE MINÉRIO DE FERRO.

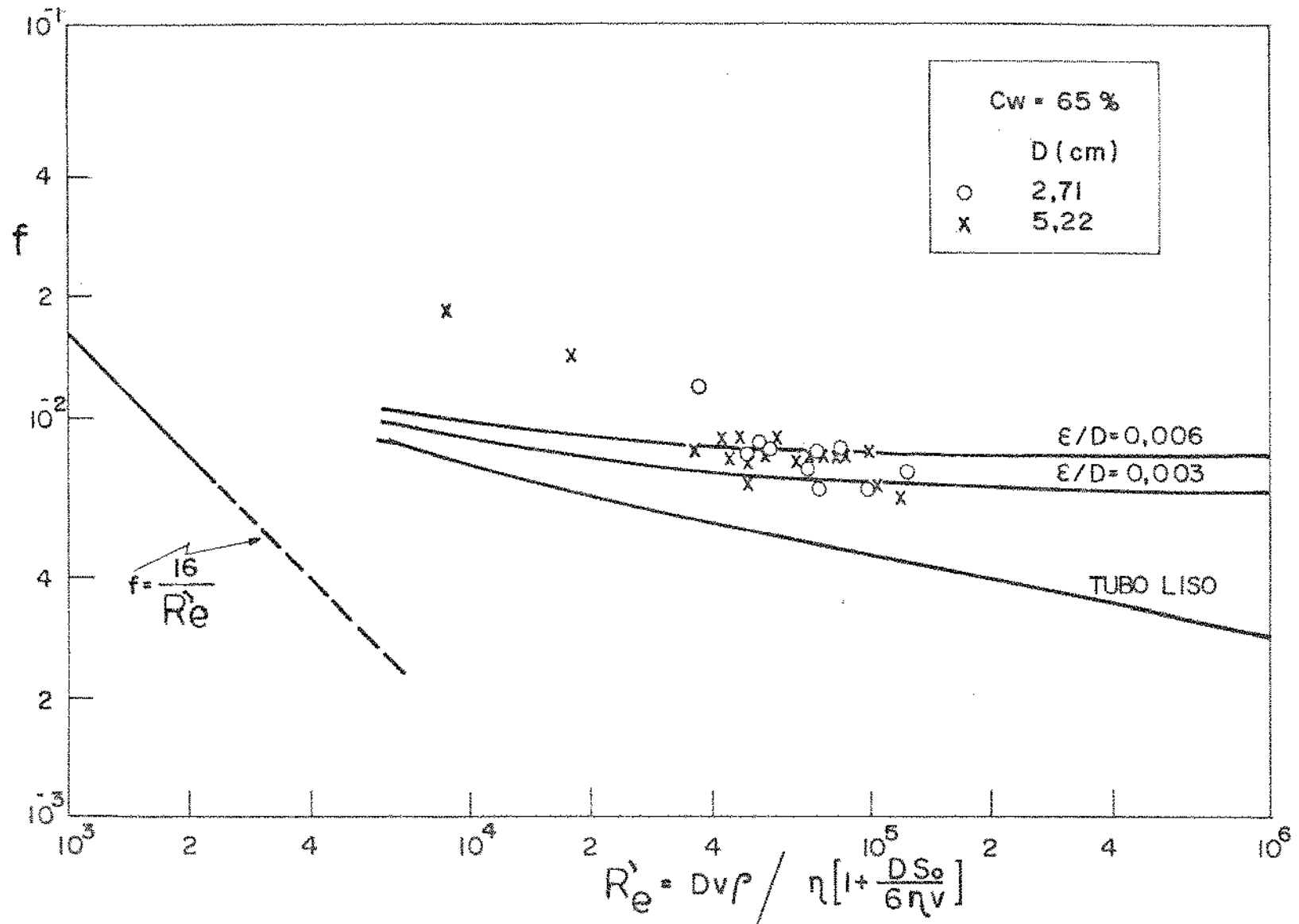


FIGURA V.17 - FATOR DE ATRITO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO PARA SUSPENSÃO DE MINÉRIO DE FERRO.

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### VI.1. REGIME LAMINAR

Os dois modelos simplificados já comentados anteriormente e definidos pelas equações (II.1) e (II.2) se ajustaram suficientemente bem aos resultados experimentais tomados com suspensões de Hematita escoando em tubos numa faixa de 0,1 a 0,2 cm de diâmetro, como mostrado nas Figuras (V.1) a (V.6).

Os dados experimentais foram convertidos para estas coordenadas usando a expressão de *Rabinowitsch & Mooney* dada pela equação (III.3) e os coeficientes que aparecem nas equações (II.1) e (II.2) foram determinadas para um melhor ajuste dos dados na faixa de taxa de deformação de 150 a 4000 segundos<sup>-1</sup> e de tensão cisalhante de 10 a 90 dina/cm<sup>2</sup>. Os valores mostrados nas Tabelas (V.1) a (V.3) foram usados na construção dos gráficos (V.10) a (V.13).

Para o modelo de *Ostwald-de Waele* o índice de comportamento do escoamento,  $n$ , diminui progressivamente com o aumento da concentração de sólidos e cresce com o aumento de temperatura enquanto que o índice de consistência  $K$ , cresce exponencialmente com a concentração e temperatura. No modelo de *Bingham* a tensão cisalhante limite,  $S_0$ , cresce com a concentração e diminui com a temperatura, enquanto que o coeficiente de rigidez,  $\eta$ , diminui com a temperatura e aumenta monotonicamente com a concentração até uma concentração de aproximadamente 50% em peso. Para concentrações maiores o coeficiente de rigidez aumenta numa taxa mais elevada, como indicado na Figura V.

De um modo geral, podemos notar que o efeito da concentração é muito mais acentuado do que o da temperatura nos valores dos parâmetros reológicos.

Na Figura (VI.1) temos para uma determinada temperatura e concentração alguns valores de  $L/D$  utilizados nas medidas experimentais, onde se vê que o efeito de entrada pode ser desprezado nas experiências com os tubos mencionados.

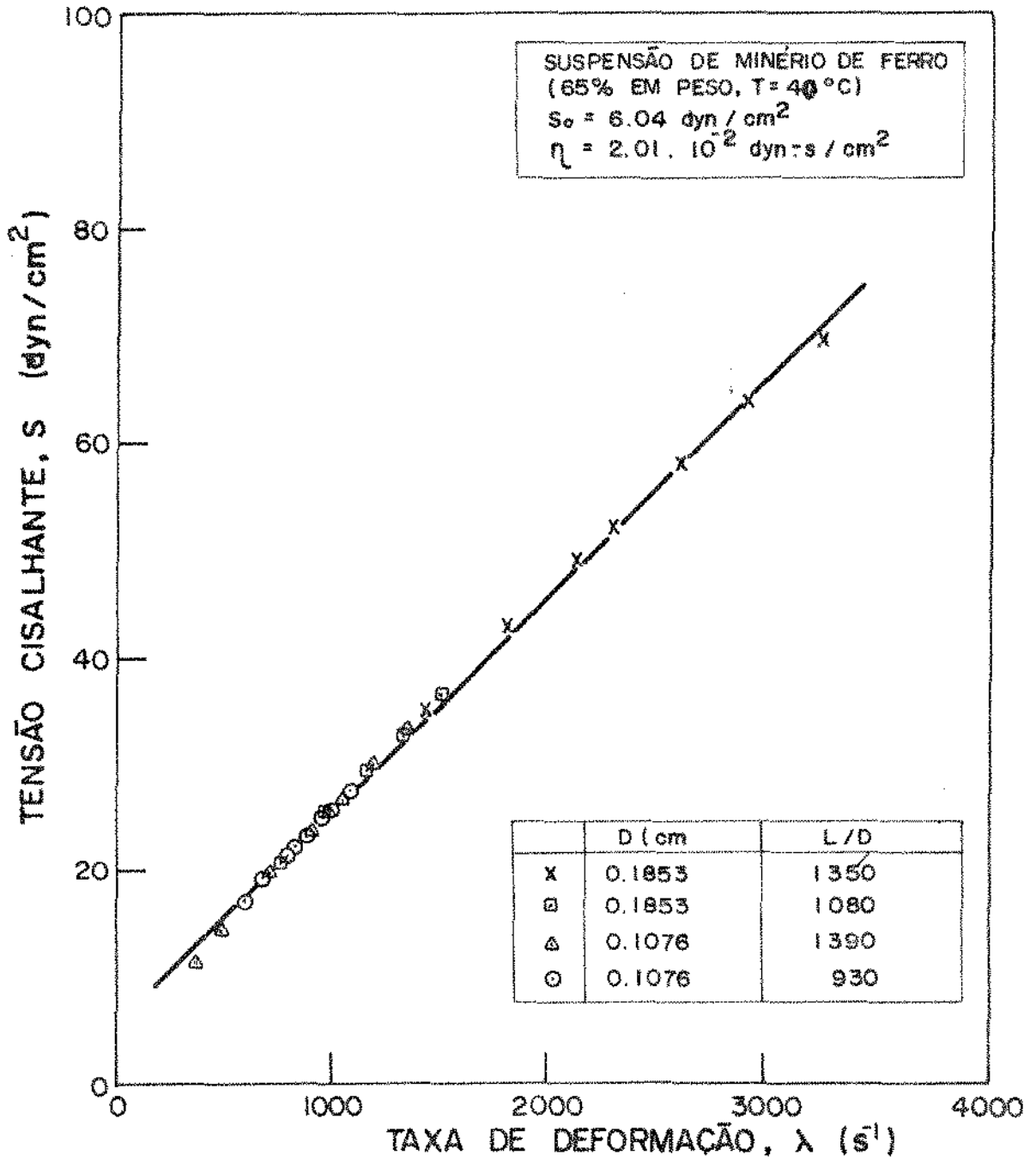


FIGURA.VI.1-CURVA REOLÓGICA OBTIDA COM CAPILARES DE DIFERENTES DIÂMETROS E COMPRIMENTOS.

## VI.2. TRANSIÇÃO LAMINAR TURBULENTO

Na Tabela (V.4) foi mostrado para várias correlações os resultados de  $v_T$  calculados. A correlação de *Sinclair*, equação (III.30), considerando que  $d_{85}/D$  é suficientemente pequeno, não leva em consideração o diâmetro do tubo e nem a concentração fornecendo uma superestimativa do valor de  $v_T$ .

As duas correlações de *Spells*, dependem de concentração e do diâmetro, sendo que a equação (III.28) obtém valores de  $v_T$  sempre inferiores aos obtidos pela equação (III.29).

Considerando o modelo de *Bingham*, a correlação de *Thomas*, a equação (III.21), nos fornece uma faixa de  $v_T$  com Número de *Reynolds* entre 2000 a 6000 com base em dados atuais que indicam que as características de fluido não-newtoniano causam transições nesta faixa. A correlação de *Durand*, equação (III.23) que leva em consideração os parâmetros reológicos do modelo de *Bingham* além da concentração e diâmetro do tubo, fornece valores de  $v_T$  próximo aos das equações (III.28) e (III.29).

## VI.3. REGIME TURBULENTO

Os valores do fator de atrito  $f$ , para as concentrações em peso de 40%, 50% e 65% e diâmetros de tubos de 5,22 cm e 2,71 cm foram calculados com os diversos tipos de correlações mostradas na Tabela (III.2), procuramos avaliar o desempenho dos vários métodos de cálculo, de modo a evidenciar um procedimento seguro na determinação da queda de pressão no escoamento das suspensões de Hematita. Com o uso da equação (III.32), o fator de atrito foi calculado para dois diferentes Números de *Reynolds*. Com o Número de *Reynolds*,  $Re^*$ , definido pela equação (III.10) onde utiliza-se como viscosidade o coeficiente de rigidez  $\eta$ , obtém-se boa aproximação entre o fator de atrito calculado e o experimental com um valor de  $(f \text{ exp.}/f \text{ calc.})_{\text{médio}}$  igual a 1,17 para Número de *Reynolds* acima de  $6 \times 10^4$  e menores que  $3 \times 10^5$ . Com a utilização do Número de *Reynolds*,  $Re'$  definido pela equação (III.20), obtém-se uma aproximação ainda melhor que o anterior entre o  $f \text{ exp.}$  e  $f \text{ calc.}$ , obtendo-se  $(f \text{ exp.}/f \text{ calc.})_{\text{médio}}$  igual a 1,13, para Número de *Reynolds* superiores a  $3 \times 10^4$  e inferiores a  $2 \times 10^5$ .

As restrições quanto ao Número de *Reynolds* limite é que

se observou desvios bastante acentuados entre o  $f_{exp.}$  e  $f_{calc.}$  para Número de *Reynolds* abaixo destes limites o que pode ser explicado pelo fato que com a diminuição da velocidade, deixou de existir um perfil de concentração uniforme deixando a suspensão de ser homogênea, acarretando mudanças no comportamento do escoamento.

Para correlações dadas pelas equações (III.36) , (III.38) e (III.44) com os respectivos Números de *Reynolds* definidos pelas equações (III.10), (III.14) e (III.16), na comparação do fator de atrito experimental com o calculado, verificou-se desvios bastante acentuados para uma faixa de Número de *Reynolds* bastante ampla com desvios médios da ordem de 167%.

A correlação definida pelos parâmetros de Bowen, equação (III.39), independente do modelo reológico fornece uma boa proximidade entre  $f_{exp.}$  e  $f_{calc.}$ , com  $(f_{exp.}/f_{calc.})_{médio}$  igual a 1,00 o que era de se esperar visto que os parâmetros foram obtidos dos dados experimentais. Para o caso das suspensões de Hematita utilizada neste trabalho, não se dispõe de resultados experimentais para tubos de diâmetros maiores de modo a verificar a adequação dos vários métodos indicados anteriormente para a extrapolação dos resultados. De modo a ilustrar a aplicação dos três primeiros métodos na extrapolação dos resultados para tubos de grande diâmetros, são apresentados nas Tabelas (VI.1) e (VI.2) cálculos efetuados para queda de pressão e para a potência de bombeamento.

Na Tabela (VI.1) apresentamos valores de queda de pressão calculada para um tubo de 50,8 cm de diâmetro, e na Tabela (VI.2) são indicados as potências de bombeamento para o caso do Mineroduto SAMARCO, no qual é bombeada em 400Km de extensão a suspensão do minério utilizado nesse trabalho, com concentração em torno de 65% em peso. A temperatura utilizada para os cálculos foi de 30°C. Nesses cálculos foi utilizada a vazão de 0,28 m<sup>3</sup>/s e levado em conta o desnível de 1000 metros entre a entrada e a saída da tubulação, e ainda considerada uma eficiência de 100% para as bombas.

Dos resultados apresentados para o escoamento turbulento verifica-se que para as suspensões de Hematita, os dois primeiros métodos indicados nas Tabelas (V.5) e (VI.1) conduzem a resultados mais consistentes, na faixa das variáveis analisadas

TABELA (VI.1) - RESULTADOS DO CÁLCULO DA QUEDA DE PRESSÃO PARA DIFERENTES MÉTODOS E CONCENTRAÇÕES

MÉTODO		$\Delta P/L$ (N/m <sup>3</sup> )		
FATOR DE ATRITO (f)	NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO	(% em peso)		
		40	50	65
Eq. (III.32)	Re* Eq. (III.10)	37,03	41,94	53,70
Eq. (III.32)	Re' Eq. (III.20)	57,75	68,83	90,95
Eq. (III.40)	Re <sub>B</sub> Eq. (III.41)	41,55	76,29	102,74



TABELA (VI.2) - POTÊNCIA DE BOMBEAMENTO CALCULADA PARA O MINERODUTO SAMARCO \*

MÉTODO		POTÊNCIA (HP) (EFICIÊNCIA = 100%)	POTÊNCIA CALCULADA POTÊNCIA INSTALADA
FATOR DE ATRITO (f)	NÚMERO DE REYNOLDS MODIFICADO		
Eq. (III.32)	$Re^*$ Eq. (III.10)	7284	0,49
Eq. (III.32)	$Re'$ Eq. (III.20)	12897	0,86
Eq. (III.40)	$Re_B$ Eq. (III.41)	14668	0,98
Eq. (III.44)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	6791	0,45
Eq. (III.36)	$Re^*$ Eq. (III.10)	5718	0,38
Eq. (III.38)	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	3736	0,25

\* POTÊNCIA INSTALADA = 15000 HP

neste trabalho, considerando-se que a eficiência de bombeamento se situa normalmente na faixa de 60% a 80%.

A aplicação do método de *Bowen* para tubos de grande diâmetro (da ordem de 50cm) indica que para suspensões de concentração em peso igual a 40%, os valores da queda de pressão calculada se situam entre os valores calculados com os dois métodos citados, enquanto que nas concentrações mais elevadas apresenta sistematicamente resultados superiores com desvios da ordem de 12% com relação ao método que utiliza as equações (III.32) e (III.20).

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Apesar do desenvolvimento tecnológico dos minerodutos já se encontrar em uma fase relativamente avançada o projetista em geral se depara com a escolha do modelo reológico e do melhor relacionamento entre as variáveis do sistema que lhe permite calcular a queda de pressão no escoamento turbulento.

Neste trabalho, os dados experimentais no escoamento lamínar se ajustaram satisfatoriamente para os dois modelos simplificados (*Bingham & Ostwald-de Waele*) o que nos permitiu testar várias correlações para a previsão do fator de atrito e comparar com valores experimentais. Com esse objetivo foram obtidos dados experimentais no escoamento turbulento, em tubos de 2,71cm e 5,22cm de diâmetro de modo a verificar a adequação de vários métodos de cálculo da queda de pressão nesse escoamento.

Entre os modos de correlacionamento considerados nesse trabalho, verificamos que o fator de atrito calculado através do gráfico convencional de *Moody* (equação de *Colebrook*) quando consideramos o modelo de *Bingham* para definição dos Números de *Reynolds* indicados pelas equações (III.30) e (III.20), foi o que apresentou melhor desempenho quando comparamos as previsões com resultados experimentais. Com esses métodos verificou-se que para as suspensões de minério de ferro escoando em tubos de 2,71cm e 5,22cm de diâmetro, obteve-se para o fator de atrito um desvio máximo em torno de 20%. A aplicação desse método é bastante simples desde que seja conhecido a reologia da suspensão, levando a resultados seguros, na faixa das variáveis estudadas.

Neste trabalho não foi possível verificar diretamente a validade do método de extrapolação proposto por *Bowen*, para a determinação da queda de pressão para tubos de diâmetros maiores, o que seria possível com medidas experimentais com um terceiro diâmetro diferente de 2,71cm e 5,22cm e comparar com os valores extrapolados. Os três métodos citados levam contudo a resultados satisfatórios quando comparamos a potência calculada com o valor da potência instalada no Mineroduto SAMARCO, apresentando-se o método de *Bowen* com uma tendência a superestimar

a queda de pressão no escoamento com um desvio do ordem de 10%.

Uma continuação natural deste trabalho seria a verificação de influência do tamanho médio e da distribuição de tamanhos das partículas na reologia das suspensões visto que os resultados aqui obtidos se referem a amostras de uma dada granulometria.

De modo a obter maior segurança na extrapolação dos parâmetros reológicos e da queda de pressão no escoamento turbulento, sugerimos ainda efetuar a extensão da faixa de valores de  $S_w$  e  $Y$  com a utilização de outros tipos de reômetros e a obtenção de dados no escoamento turbulento com tubos de maior diâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) *Wasp, E.J., Kenny, J.P., Gandhi, R.L.*, "Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportat", Series on Bulk Materials Handling, vol. 1 (1975-77) No.4, Trans Tech Publications.
- 2) *Jennings, H.V.*, "Effect of Surfactants on the Rheology of Hematite Slurries", J. Am. Oil Chemists Society, vol.46, Dec., 1969.
- 3) *Linford, A., Saunders, D.H.*, "The Hydraulic Transport of iron ore", British Hydromechanics Research Association, Fluid Engineering.
- 4) *Jennings, H.V.*, "Flow behavior of Hematite Slurries", Journal of Engineering for Industry, February, p. 75-77- 1973.
- 5) *Schniek, W., Smith, L.G., Haas, D., Husband, W.A.W.*, "Experimental Studies on the Hydraulic Transport of iron ore", Report III, Saskatchewan Research Council, July, 1973.
- 6) *Carleton, A.J., Cheng, D.C.H.*, "In-Plant Slurry Handling", Chemical Engineering, April, 25, p.94, 1977.
- 7) *Goedde, E.*, "To the Critical velocity of Heterogeneous Hydraulic Transport", Hydrotransport 5, B.H.R.A., p. B4-81.
- 8) *Thomas, D.G.*, "Suspensions Non-Newtonian, I, Physical Properties and Laminar Transport Characteristics", Industrial and Engineering Chemistry, vol. 55, No 11, November 1963.
- 9) *Thomas, D.G.*, "Suspensions Non-Newtonian, II, Turbulent Transport Characteristics", Industrial and Engineering Chemistry, vol. 55, No. 12, December, 1963.
- 10) *Jeffrey, D.J., Achivos, A.*, "The Rheological Properties of Suspensions of Rigid Particles", AIChE Journal, vol. 22 No. 3, May 1976.
- 11) *Ansley, R.W., Smith, T.N.*, "Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic", AIChE Journal, vol. 13, No. 6, November, 1976.

- 12) Bowen, Le R., "Designing Laminar Flow Systems", Chemical Engineering, June 12, 1961, p. 243.
- 13) Bowen, Le R., "Determining and of Laminar Region" Chemical Engineering, June 26, 1961, p. 127.
- 14) Bowen, Le R., "Turbulent Flow-A Historical Review", Chemical Engineering, July 10, 1961, p. 147.
- 15) Bowen, Le R., "Designing Turbulent Flow Systems", Chemical Engineering, July 24, 1961, p. 143.
- 16) Bowen, Le R., "How to Handle Slurries", Chemical Engineering, Aug. 7, 1961, p. 129.
- 17) Bowen, Le R., "Best Methods for obtaining Flow Data", Chemical Engineering, Aug. 21, 1961, p. 119.
- 18) Bowen, Le R., "Interpreting and Converting Data", Chemical Engineering, September 4, 1961, p. 131.
- 19) Oroskar, A.R., Turian, R.M., "The Critical Velocity in Pipeline Flow of Slurries", AIChE Journal, vol. 26, No.4, July, 1980, p. 550.
- 20) Tomita, Y., "A Study on Non-Newtonian Flow in Pipe Lines", Bulletin of JSME, vol. 2, No. 5, 1959, p. 10.
- 21) Metzner, A.B., Reed, J.C., "Flow of Non-Newtonian Fluids Correlation of the Laminar, Transition, and Turbulent-Flow Regions", AIChE Journal, vol. 1, No. 4, December, 1955, p. 434.
- 22) Dodge, D.W., Metzner, A.B., "Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems", AIChE Journal, vol. 5 No. 2, June, 1959, p. 189.
- 23) Spells, K.E., "Correlations for use in Transport of Aqueous Suspensions of fine solids Through Pipes", Trans. Instn. Chem. Engrs., vol. 33, 1955, p. 79.
- 24) Sinclair, C.G., "The Limit Deposit velocity of Heterogeneous Suspensions", Interaction between Fluids and Particles, (London: Instn. Chem. Engrs.), p. 78, 1962.
- 25) Duplessis, M.P., Ansley, R., "Settling Parameter in Solids Pipelining", Journal of the Pipeline Division proceedings of the American Society of Civil Engineers, July, 1967, p. 1.

- 26) Weber, M., Goedde, E., "Critical velocity as Optimum Operating velocity in Solids Pipelining", Hydrotransport 4, BHRA, p. D2-17.
- 27) Robinson, M.P., Graff, W.H., "Pipelining of Low-Concentration Sand-Water Mixtures", Journal of the Hydraulics Division, proceedings of the American Society of Civil Engineers, July, 1972, p. 1220.
- 28) Vocadeo, J.J., Charles, M.E., "Transportation of Slurries", The Canadian Mining and Metallurgical, (CIM) Bulletin for October, 1972, p. 113.
- 29) Vocadeo, J.J., Sagoo, M.S., "Slurry Flow in Pipes and Pumps", Journal of Engineering for Industry, p. 65, Feb. 1973.
- 30) Aude, T.C., Thompson, T.L., Wasp, E.J., "Slurry Pipeline Systems for Coal, other solids come of age", The oil and gas Journal, July 21, 1975, p. 66.
- 31) McDermott, W.F., "Savage River Mines - The World's First Long-Distance Iron Ore Slurry Pipeline", The Canadian Mining and Metallurgical, (CIM) Bulletin for December, 1970, p. 1378.
- 32) Zandi, I., "Hydraulic Transport of bulky materials", Advances in Solid-Liquid Flows in pipes and application, p. 1, Pergamon Press, 1968.
- 33) Hanks, R.W., "Low Reynolds Number Turbulent Pipeline Flow of Pseudo homogeneous Slurries", Hydrotransport 5, BHRA, 1978, p. C2-23.
- 34) Hanks, R.W., Dadia, B.H., "Theoretical Analysis of the Turbulent Flow of Non-Newtonian Slurries in Pipes", AIChE Journal, vol. 17, No. 3, p. 554, May 1971.
- 35) Hanks, R.W., "On the Theoretical Calculation of Friction Factors for Laminar, Transitional and Turbulent Flow of Newtonian Fluids in Pipes and between Parallel Plane Walls", AIChE Journal, vol. 14, No. 5, p. 691, September 1968.
- 36) Durand, R., Condolios, E., "Hydraulic Transport of Coal and Solid Material in Pipes", Proc., Colloq. on Hydraulic Transportation, London, Nov. 1952.

- 37) *Massarani, G.*, "Viscosímetro Capilar de tubos descartáveis", 4º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Belo Horizonte, julho de 1980.
- 38) *Davis, J.C.*, "Long-Distance Slurry Transport finally in the Pipeline", *Chemical Engineering*, April 12, 1970, p. 67.
- 39) *Kemłowski, Z., Kołodziejcki, J.*, "Flow resistances of Non-Newtonian Fluids in Transitional and Turbulent Flow", *International Chemical Engineering*, vol. 13, No. 2, April, 1973, p. 265.
- 40) *Heywood, N.I., Richardson, J.F.*, "Rheological Behavior of Flocculated and Dispersed Aqueous Kaolin Suspensions in Pipe Flow", *Journal of Rheology*, 22 (6), 599-613, 1978.
- 41) *Santana, C.C.*, "Transporte Hidráulico de Partículas Sólidas", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 1979.
- 42) *Jínescu, V.V.*, "The Rheology of Suspensions", *International Chemical Engineering*, vol. 14, No. 3, July 1974, p. 397.
- 43) *Hanks, R.W., Pratt, D.R.*, "On the Flow of Bingham Plastic Slurries in Pipes and between Parallel Plates", *Society of Petroleum Engineers Journal*, December 1967, p. 342.
- 44) *Hedstrom, B.O.A.*, "Flow of Plastic Materials in Pipes", *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, p. 651-656, 1952.
- 45) *Ryan, N.W., Johnson, M.M.*, "Transition from Laminar to Turbulent Flow in Pipes", *AICHE Journal*, vol. 5, p. 433-435.
- 46) *McMillen, E.L.*, "Simplified Pressure loss Calculation for Plastic Flow", *Chem. Engng. Prog.*, vol. 44, p. 537-546, (1948).
- 47) *Newitt, D.M., Richardson, J.F., Abbott, M., Turtle, R.B.*, "Hydraulic Conveying of Solids in Horizontal Pipes", *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, vol. 33, p. 93, 1955.
- 48) *Thomas, D.G.*, *AICHE Journal*, 8, 373, 1962.
- 49) *Buckingham, E.*, "On Plastic Flow through Capillary Tubes", *ASTM Proc.*, 29, 21, 1154, (1921).
- 50) *Rabinowitsch, B.Z.*, *Phisik. Chem. Ser. A*, 145, 1 (1929).
- 51) *Mooney, M.J.*, *J. Rheol.* 2, 210, (1931)



- 52) *Shaver, R.G., Mennil, E.W.*, "Turbulent Flow of Pseudo-Plastic Polymer Solutions in Straight Cylindrical Tubes", *AICHE Journal*, vol. 5, 181-188, 1959.
- 53) *Millikan, C.B.*, "A Critical Discussion of Turbulent Flows in Channels and Circular Tubes", *Proceeding 5<sup>th</sup> International Congress for Applied Mechanics*, p. 386-390, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 1939.
- 54) *Quader, A.K.M.A., Wilkinson, W.L.*, "Correlation of Turbulent Flow Rate-Pressure Drop Data for Non-Newtonian Solutions and Slurries in Pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 6, p. 553-561, Pergamon/Elsevier, 1960
- 55) *Colebrook, C.F.*, *J. Inst. Civil Engrs. (London)*, 11, 133 (1938).

APÉNDICE A

A.1 - FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE ROSIN - RAMMLER - BENNET

$$X = 1 - \exp. \left[ - (D^*/D')^{n_0} \right]$$

onde  $n_0$  é um expoente adimensional e  $D'$  um parâmetro com dimensões de comprimento.

A.2 - DIÂMETRO MÉDIO DE SAUTER

$$\bar{D} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{D^*} \frac{dX}{dD^*} dD^*}$$

com uso deste obtemos a expressão do diâmetro médio para a distribuição de Rosin - Rammler - Bennet.

$$\bar{D} = \frac{(n_0 - 1) D'}{n_0 \Gamma \left( 1 - \frac{1}{n_0} \right)}, \quad n_0 > 1$$

onde

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{n_0 - 1} dx$$

APÊNDICE B

TABELAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

NO ESCOAMENTO TURBULENTO

TABELA B.1

$$C_w = 40\%$$

$$D = 2,71\text{cm}$$

$$\rho = 1,47 \text{ g/cm}^3$$

Q ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\Delta P$ ( $\text{dina/cm}^2$ )	$8 v/D$ ( $\text{S}^{-1}$ )	$D \Delta P/4L$ ( $\text{dina/cm}^2$ )
$1,45 \times 10^3$	$1,53 \times 10^4$	$7,42 \times 10^2$	$5,20 \times 10^2$
$1,88 \times 10^3$	$2,14 \times 10^4$	$9,64 \times 10^2$	$7,20 \times 10^2$
$2,07 \times 10^3$	$2,84 \times 10^4$	$1,06 \times 10^3$	$9,61 \times 10^2$
$2,03 \times 10^3$	$3,04 \times 10^4$	$1,04 \times 10^3$	$1,03 \times 10^3$
$2,35 \times 10^3$	$3,79 \times 10^4$	$1,20 \times 10^3$	$1,28 \times 10^3$
$2,48 \times 10^3$	$4,40 \times 10^4$	$1,27 \times 10^3$	$1,49 \times 10^3$
$2,93 \times 10^3$	$4,80 \times 10^4$	$1,50 \times 10^3$	$1,63 \times 10^3$

TABELA B.2

$$C_w = 40\%$$

$$D = 5,22\text{cm}$$

$$\rho = 1,47 \text{ g/cm}^3$$

Q ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\Delta P$ ( $\text{dina/cm}^2$ )	$8 v/D$ ( $\text{S}^{-1}$ )	$D \Delta P/4L$ ( $\text{dina/cm}^2$ )
$2,87 \times 10^3$	$4,51 \times 10^3$	$2,06 \times 10^2$	$9,82 \times 10^1$
$3,59 \times 10^3$	$6,77 \times 10^3$	$2,57 \times 10^2$	$1,47 \times 10^2$
$3,92 \times 10^3$	$8,68 \times 10^3$	$2,81 \times 10^2$	$1,89 \times 10^2$
$4,43 \times 10^3$	$1,22 \times 10^4$	$3,17 \times 10^2$	$2,64 \times 10^2$
$4,69 \times 10^3$	$1,45 \times 10^4$	$3,36 \times 10^2$	$3,15 \times 10^2$
$5,53 \times 10^3$	$1,62 \times 10^4$	$3,96 \times 10^2$	$3,52 \times 10^2$
$5,35 \times 10^3$	$1,79 \times 10^4$	$3,83 \times 10^2$	$3,90 \times 10^2$
$5,91 \times 10^3$	$2,00 \times 10^4$	$4,23 \times 10^2$	$4,34 \times 10^2$
$6,25 \times 10^3$	$2,32 \times 10^4$	$4,48 \times 10^2$	$5,04 \times 10^2$
$6,88 \times 10^3$	$2,95 \times 10^4$	$4,93 \times 10^2$	$6,42 \times 10^2$
$8,74 \times 10^3$	$5,21 \times 10^4$	$6,28 \times 10^2$	$1,13 \times 10^3$
$7,76 \times 10^3$	$3,70 \times 10^4$	$5,56 \times 10^2$	$8,06 \times 10^2$
$7,67 \times 10^3$	$4,11 \times 10^4$	$5,49 \times 10^2$	$8,94 \times 10^2$
$9,60 \times 10^2$	$1,45 \times 10^3$	$6,88 \times 10^1$	$3,15 \times 10^1$
$1,71 \times 10^3$	$2,60 \times 10^3$	$1,22 \times 10^2$	$5,66 \times 10^1$

TABELA B.3

$$C_w = 50\%$$

$$D = 2,71\text{cm}$$

$$\rho = 1,66 \text{ g/cm}^3$$

$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\Delta P$ ( $\text{dina/cm}^2$ )	$8 v/D$ ( $\text{S}^{-1}$ )	$D \Delta P/4L$ ( $\text{dina/cm}^2$ )
$1,53 \times 10^3$	$1,59 \times 10^4$	$7,83 \times 10^2$	$5,39 \times 10^2$
$1,92 \times 10^3$	$2,32 \times 10^4$	$9,82 \times 10^2$	$7,86 \times 10^2$
$1,98 \times 10^3$	$2,69 \times 10^4$	$1,01 \times 10^3$	$9,11 \times 10^2$
$2,43 \times 10^3$	$3,24 \times 10^4$	$1,24 \times 10^3$	$1,10 \times 10^3$
$2,73 \times 10^3$	$3,88 \times 10^4$	$1,40 \times 10^3$	$1,31 \times 10^3$
$2,08 \times 10^3$	$2,72 \times 10^4$	$1,06 \times 10^3$	$9,21 \times 10^2$

TABELA B.4

$$C_w = 50\%$$

$$D = 5,22 \text{ cm}$$

$$\rho = 1,66 \text{ g/cm}^3$$

$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\Delta P$ ( $\text{dina/cm}^2$ )	$8 v/D$ ( $\text{S}^{-1}$ )	$D \Delta P/4L$ ( $\text{dina/cm}^2$ )
$1,45 \times 10^3$	$1,63 \times 10^4$	$3,69 \times 10^2$	$3,54 \times 10^2$
$8,76 \times 10^3$	$4,97 \times 10^4$	$6,27 \times 10^2$	$1,08 \times 10^3$
$7,52 \times 10^3$	$3,83 \times 10^4$	$5,38 \times 10^2$	$8,33 \times 10^2$
$7,04 \times 10^3$	$3,34 \times 10^4$	$5,04 \times 10^2$	$7,27 \times 10^2$
$6,50 \times 10^3$	$2,82 \times 10^4$	$4,66 \times 10^2$	$6,14 \times 10^2$
$5,95 \times 10^3$	$2,39 \times 10^4$	$4,26 \times 10^2$	$5,19 \times 10^2$
$5,23 \times 10^3$	$1,89 \times 10^4$	$3,74 \times 10^2$	$4,11 \times 10^2$
$5,13 \times 10^3$	$1,78 \times 10^4$	$3,68 \times 10^2$	$3,87 \times 10^2$
$4,49 \times 10^3$	$1,50 \times 10^4$	$3,22 \times 10^2$	$3,26 \times 10^2$
$4,01 \times 10^3$	$1,17 \times 10^4$	$2,87 \times 10^2$	$2,55 \times 10^2$
$3,11 \times 10^3$	$8,69 \times 10^3$	$2,22 \times 10^2$	$1,89 \times 10^2$
$2,51 \times 10^3$	$5,89 \times 10^3$	$1,79 \times 10^2$	$1,28 \times 10^1$
$1,71 \times 10^3$	$3,90 \times 10^3$	$1,22 \times 10^2$	$3,48 \times 10^2$
$1,48 \times 10^3$	$2,82 \times 10^3$	$1,06 \times 10^2$	$6,14 \times 10^1$
$1,12 \times 10^3$	$1,95 \times 10^3$	$8,02 \times 10^1$	$4,24 \times 10^1$



TABELA B.5

$$C_w = 65\%$$

$$D = 2,71\text{cm}$$

$$\rho = 2,07 \text{ g/cm}^3$$

Q (cm <sup>3</sup> /s)	$\Delta P$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$8 v/D$ (S <sup>-1</sup> )	$D \Delta P/4L$ (dina/cm <sup>2</sup> )
1,66x10 <sup>3</sup>	2,08x10 <sup>4</sup>	8,49x10 <sup>2</sup>	7,05x10 <sup>2</sup>
2,19x10 <sup>3</sup>	3,30x10 <sup>4</sup>	1,12x10 <sup>3</sup>	1,12x10 <sup>3</sup>
2,85x10 <sup>3</sup>	4,92x10 <sup>4</sup>	1,46x10 <sup>3</sup>	1,67x10 <sup>3</sup>
1,35x10 <sup>3</sup>	2,03x10 <sup>4</sup>	6,91x10 <sup>2</sup>	6,88x10 <sup>2</sup>
1,75x10 <sup>3</sup>	2,46x10 <sup>4</sup>	8,95x10 <sup>2</sup>	8,33x10 <sup>2</sup>
1,86x10 <sup>3</sup>	2,69x10 <sup>4</sup>	9,52x10 <sup>2</sup>	9,11x10 <sup>2</sup>
2,29x10 <sup>3</sup>	3,21x10 <sup>4</sup>	1,17x10 <sup>3</sup>	1,09x10 <sup>3</sup>
2,26x10 <sup>3</sup>	3,88x10 <sup>4</sup>	1,16x10 <sup>3</sup>	1,31x10 <sup>3</sup>
2,65x10 <sup>3</sup>	5,18x10 <sup>4</sup>	1,31x10 <sup>3</sup>	1,75x10 <sup>3</sup>
3,45x10 <sup>3</sup>	8,10x10 <sup>4</sup>	1,77x10 <sup>3</sup>	2,74x10 <sup>3</sup>

TABELA B.6

$$C_w = 65\%$$

$$D = 5,22\text{cm}$$

$$\rho = 2,07\text{ g/cm}^3$$

$Q$ ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\Delta P$ ( $\text{dina/cm}^2$ )	$8 v/D$ ( $\text{S}^{-1}$ )	$D \Delta P/4L$ ( $\text{dina/cm}^2$ )
$4,79 \times 10^3$	$1,64 \times 10^4$	$3,43 \times 10^2$	$3,57 \times 10^2$
$8,76 \times 10^3$	$5,05 \times 10^4$	$6,27 \times 10^2$	$3,57 \times 10^3$
$8,04 \times 10^3$	$4,57 \times 10^4$	$5,76 \times 10^2$	$8,94 \times 10^2$
$6,79 \times 10^3$	$3,86 \times 10^4$	$4,86 \times 10^2$	$8,40 \times 10^2$
$6,10 \times 10^3$	$3,12 \times 10^4$	$4,37 \times 10^2$	$6,78 \times 10^2$
$5,76 \times 10^3$	$2,75 \times 10^4$	$4,12 \times 10^2$	$5,99 \times 10^2$
$5,14 \times 10^3$	$2,21 \times 10^4$	$3,68 \times 10^2$	$4,80 \times 10^2$
$4,76 \times 10^3$	$1,84 \times 10^4$	$3,40 \times 10^2$	$4,01 \times 10^2$
$4,36 \times 10^3$	$1,78 \times 10^4$	$3,13 \times 10^2$	$3,88 \times 10^2$
$7,64 \times 10^3$	$5,06 \times 10^4$	$5,47 \times 10^2$	$1,10 \times 10^3$
$7,00 \times 10^3$	$4,18 \times 10^4$	$5,01 \times 10^2$	$9,10 \times 10^2$
$6,43 \times 10^3$	$3,48 \times 10^4$	$4,60 \times 10^2$	$7,56 \times 10^2$
$5,34 \times 10^3$	$2,59 \times 10^4$	$3,83 \times 10^2$	$5,64 \times 10^2$
$4,75 \times 10^3$	$2,02 \times 10^4$	$3,40 \times 10^2$	$4,40 \times 10^2$
$4,52 \times 10^3$	$1,70 \times 10^4$	$3,23 \times 10^2$	$3,70 \times 10^2$
$4,00 \times 10^3$	$1,38 \times 10^4$	$2,87 \times 10^2$	$3,00 \times 10^2$
$2,57 \times 10^3$	$9,70 \times 10^3$	$1,84 \times 10^2$	$2,11 \times 10^2$
$1,71 \times 10^3$	$5,66 \times 10^3$	$1,23 \times 10^2$	$1,23 \times 10^2$
$8,45 \times 10^2$	$2,02 \times 10^3$	$6,05 \times 10^1$	$4,40 \times 10^1$
$4,64 \times 10^3$	$2,02 \times 10^4$	$3,33 \times 10^2$	$4,40 \times 10^2$

APÊNDICE C

TABELAS COM OS VALORES DO FATOR DE ATRITO NO

ESCOAMENTO TURBULENTO

TABELA C.1

$C_w = 40\%$

$S_o = 3,00 \text{ dina/cm}^2$

$D = 2,71 \text{ cm}$

$\eta = 1,16 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re'$ Eq. (III.20)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_B$ Eq. (III.41)	$f_{calc}$ Eq. (III.40)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$1,12 \times 10^{-2}$	$8,61 \times 10^4$	$8,27 \times 10^{-3}$	1,35	$5,86 \times 10^4$	$8,38 \times 10^{-3}$	1,34	$1,81 \times 10^2$	$1,10 \times 10^{-2}$	1,02
$9,22 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^5$	$8,22 \times 10^{-3}$	1,12	$8,24 \times 10^4$	$8,28 \times 10^{-3}$	1,11	$1,97 \times 10^2$	$1,02 \times 10^{-2}$	0,90
$1,02 \times 10^{-2}$	$1,23 \times 10^5$	$8,20 \times 10^{-3}$	1,24	$9,25 \times 10^4$	$8,25 \times 10^{-3}$	1,24	$2,03 \times 10^2$	$9,87 \times 10^{-3}$	1,03
$1,14 \times 10^{-2}$	$1,20 \times 10^5$	$8,20 \times 10^{-3}$	1,39	$9,02 \times 10^4$	$8,26 \times 10^{-3}$	1,38	$2,01 \times 10^2$	$9,94 \times 10^{-3}$	1,15
$1,05 \times 10^{-2}$	$1,40 \times 10^5$	$8,18 \times 10^{-3}$	1,28	$1,09 \times 10^5$	$8,22 \times 10^{-3}$	1,28	$2,11 \times 10^2$	$9,49 \times 10^{-3}$	1,11
$1,10 \times 10^{-2}$	$1,47 \times 10^5$	$8,17 \times 10^{-3}$	1,35	$1,16 \times 10^5$	$8,21 \times 10^{-3}$	1,34	$2,14 \times 10^2$	$9,33 \times 10^{-3}$	1,18
$8,57 \times 10^{-3}$	$1,74 \times 10^5$	$8,15 \times 10^{-3}$	1,05	$1,41 \times 10^5$	$8,18 \times 10^{-3}$	1,05	$2,26 \times 10^2$	$8,86 \times 10^{-3}$	1,08

TABELA C.2

$C_w = 40\%$        $S_o = 3,00 \text{ dina/cm}^2$   
 $D = 5,22 \text{ cm}$        $n = 1,16 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

fexp Eq. (III.12)	Re* Eq. (III.10)	fcalc Eq. (III.32)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re' Eq. (III.20)	fcalc Eq. (III.32)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re <sub>B</sub> Eq. (III.41)	fcalc Eq. (III.40)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$
$7,43 \times 10^{-5}$	4 8,87x10	$6,91 \times 10^{-3}$	1,08	4 3,31x10	$7,42 \times 10^{-3}$	1,00	2 1,98x10	$1,01 \times 10^{-2}$	0,74
$7,10 \times 10^{-3}$	5 1,11x10	$6,84 \times 10^{-3}$	1,04	4 4,74x10	$7,18 \times 10^{-3}$	0,99	2 2,12x10	$9,42 \times 10^{-3}$	0,75
$7,67 \times 10^{-3}$	5 1,21x10	$5,60 \times 10^{-3}$	1,37	4 5,45x10	$7,11 \times 10^{-3}$	1,08	2 2,18x10	$9,17 \times 10^{-3}$	0,84
$8,43 \times 10^{-3}$	5 1,37x10	$6,78 \times 10^{-3}$	1,24	4 6,56x10	$7,02 \times 10^{-3}$	1,20	2 2,26x10	$8,85 \times 10^{-3}$	0,95
$8,95 \times 10^{-3}$	5 1,45x10	$6,77 \times 10^{-3}$	1,32	4 7,14x10	$6,99 \times 10^{-3}$	1,28	2 2,30x10	$8,68 \times 10^{-3}$	1,03
$7,20 \times 10^{-3}$	5 1,71x10	$6,74 \times 10^{-3}$	1,07	4 9,14x10	$6,90 \times 10^{-3}$	1,04	2 2,42x10	$8,25 \times 10^{-3}$	0,87
$8,48 \times 10^{-3}$	5 1,66x10	$6,74 \times 10^{-3}$	1,26	4 8,74x10	$6,91 \times 10^{-3}$	1,23	2 2,40x10	$8,35 \times 10^{-3}$	1,02
$7,77 \times 10^{-3}$	5 1,85x10	$6,73 \times 10^{-3}$	1,15	5 1,01x10	$6,86 \times 10^{-3}$	1,13	2 2,48x10	$8,08 \times 10^{-3}$	0,96
$8,05 \times 10^{-3}$	5 1,93x10	$6,72 \times 10^{-3}$	1,20	5 1,09x10	$6,84 \times 10^{-3}$	1,18	2 2,52x10	$7,94 \times 10^{-3}$	1,01
$8,47 \times 10^{-3}$	5 2,15x10	$6,70 \times 10^{-3}$	1,26	5 1,25x10	$6,81 \times 10^{-3}$	1,24	2 2,59x10	$7,71 \times 10^{-3}$	1,10
$9,26 \times 10^{-3}$	5 2,70x10	$6,67 \times 10^{-3}$	1,59	5 1,74x10	$6,73 \times 10^{-3}$	1,38	2 2,79x10	$7,16 \times 10^{-3}$	1,29
$8,31 \times 10^{-3}$	5 2,40x10	$6,68 \times 10^{-3}$	1,24	5 1,48x10	$6,71 \times 10^{-3}$	1,24	2 2,70x10	$7,42 \times 10^{-3}$	1,12
$9,49 \times 10^{-3}$	5 2,37x10	$6,68 \times 10^{-3}$	1,42	5 1,45x10	$6,77 \times 10^{-3}$	1,40	2 2,68x10	$7,45 \times 10^{-3}$	1,27
$2,15 \times 10^{-2}$	4 2,97x10	$7,50 \times 10^{-3}$	2,84	3 4,94x10	$1,02 \times 10^{-2}$	2,09	2 1,41x10	$1,42 \times 10^{-2}$	1,50
$1,21 \times 10^{-2}$	4 5,29x10	$7,62 \times 10^{-3}$	1,59	4 1,38x10	$8,31 \times 10^{-3}$	1,46	2 1,69x10	$1,19 \times 10^{-2}$	1,02

TABELA C.3

$C_w = 50\%$

$S_o = 4,37 \text{ dina/cm}^2$

$D = 2,71\text{cm}$

$\eta = 1,36 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re'$ Eq. (III.20)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_B$ Eq. (III.41)	$f_{calc}$ Eq. (III.40)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$9,24 \times 10^{-3}$	$8,77 \times 10^4$	$8,27 \times 10^{-3}$	1,12	$5,66 \times 10^4$	$8,39 \times 10^{-3}$	1,10	$1,95 \times 10^2$	$1,03 \times 10^{-2}$	0,90
$8,54 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^5$	$8,22 \times 10^{-3}$	1,04	$7,64 \times 10^4$	$8,30 \times 10^{-3}$	1,03	$2,17 \times 10^2$	$9,21 \times 10^{-3}$	0,93
$9,33 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^5$	$8,21 \times 10^{-3}$	1,14	$8,03 \times 10^4$	$8,29 \times 10^{-3}$	1,13	$2,20 \times 10^2$	$9,09 \times 10^{-3}$	1,03
$7,46 \times 10^{-3}$	$1,39 \times 10^5$	$8,18 \times 10^{-3}$	0,91	$1,04 \times 10^5$	$8,23 \times 10^{-3}$	0,91	$2,42 \times 10^2$	$8,25 \times 10^{-3}$	0,90
$7,08 \times 10^{-3}$	$1,57 \times 10^5$	$8,16 \times 10^{-3}$	0,87	$1,20 \times 10^5$	$8,20 \times 10^{-3}$	0,86	$2,56 \times 10^2$	$7,81 \times 10^{-3}$	0,91
$8,57 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^5$	$8,21 \times 10^{-3}$	1,04	$8,50 \times 10^4$	$8,27 \times 10^{-3}$	1,04	$2,25 \times 10^2$	$8,88 \times 10^{-3}$	0,97

TABELA C.4

$C_w = 50\%$

$S_o = 4,37 \text{ dina/cm}^2$

$D = 5,22 \text{ cm}$

$\eta = 1,36 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re'$ Eq. (III.20)	$f_{calc}$ Eq. (III.32)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_B$ Eq. (III.41)	$f_{calc}$ Eq. (III.40)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$7,35 \times 10^{-3}$	$1,54 \times 10^5$	$6,76 \times 10^{-3}$	1,09	$7,13 \times 10^4$	$6,99 \times 10^{-3}$	1,05	$2,24 \times 10^2$	$8,93 \times 10^{-3}$	0,82
$7,79 \times 10^{-3}$	$2,51 \times 10^5$	$6,67 \times 10^{-3}$	1,17	$1,55 \times 10^5$	$6,76 \times 10^{-3}$	1,15	$2,87 \times 10^2$	$6,96 \times 10^{-3}$	1,12
$8,15 \times 10^{-3}$	$2,24 \times 10^5$	$6,69 \times 10^{-3}$	1,22	$1,24 \times 10^5$	$6,81 \times 10^{-3}$	1,20	$2,67 \times 10^2$	$7,48 \times 10^{-3}$	1,09
$8,09 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^5$	$6,70 \times 10^{-3}$	1,21	$1,14 \times 10^5$	$6,85 \times 10^{-3}$	1,18	$2,59 \times 10^2$	$7,71 \times 10^{-3}$	1,05
$8,00 \times 10^{-3}$	$1,94 \times 10^5$	$6,72 \times 10^{-3}$	1,19	$1,01 \times 10^5$	$6,86 \times 10^{-3}$	1,17	$2,50 \times 10^2$	$8,00 \times 10^{-3}$	1,00
$8,10 \times 10^{-3}$	$1,77 \times 10^5$	$6,73 \times 10^{-3}$	1,20	$8,81 \times 10^4$	$6,91 \times 10^{-3}$	1,17	$2,40 \times 10^2$	$8,35 \times 10^{-3}$	0,97
$8,32 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^5$	$6,76 \times 10^{-3}$	1,23	$7,21 \times 10^4$	$6,98 \times 10^{-3}$	1,19	$2,25 \times 10^2$	$8,88 \times 10^{-3}$	0,94
$8,10 \times 10^{-3}$	$1,53 \times 10^5$	$6,76 \times 10^{-3}$	1,20	$7,05 \times 10^4$	$6,98 \times 10^{-3}$	1,16	$2,24 \times 10^2$	$8,95 \times 10^{-3}$	0,91
$8,91 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^5$	$6,79 \times 10^{-3}$	1,31	$5,75 \times 10^4$	$7,08 \times 10^{-3}$	1,26	$2,10 \times 10^2$	$9,52 \times 10^{-3}$	0,94
$8,77 \times 10^{-3}$	$1,19 \times 10^5$	$6,82 \times 10^{-3}$	1,29	$4,76 \times 10^4$	$7,18 \times 10^{-3}$	1,22	$1,99 \times 10^2$	$1,01 \times 10^{-2}$	0,87
$1,03 \times 10^{-2}$	$9,24 \times 10^4$	$6,89 \times 10^{-3}$	1,57	$3,15 \times 10^4$	$7,46 \times 10^{-3}$	1,45	$1,76 \times 10^2$	$1,13 \times 10^{-2}$	0,96
$1,13 \times 10^{-2}$	$7,45 \times 10^4$	$6,97 \times 10^{-3}$	1,62	$2,20 \times 10^4$	$7,77 \times 10^{-3}$	1,45	$1,60 \times 10^2$	$1,25 \times 10^{-2}$	0,90
$1,60 \times 10^{-2}$	$5,09 \times 10^4$	$7,14 \times 10^{-3}$	2,24	$1,13 \times 10^4$	$8,59 \times 10^{-3}$	1,86	$1,33 \times 10^2$	$1,50 \times 10^{-2}$	1,07
$1,54 \times 10^{-2}$	$4,41 \times 10^4$	$7,23 \times 10^{-3}$	2,13	$8,73 \times 10^3$	$9,01 \times 10^{-3}$	1,71	$1,25 \times 10^2$	$1,60 \times 10^{-2}$	0,96
$1,87 \times 10^{-2}$	$3,33 \times 10^4$	$7,41 \times 10^{-3}$	2,52	$5,24 \times 10^3$	$1,00 \times 10^{-2}$	1,87	$1,09 \times 10^2$	$1,83 \times 10^{-2}$	1,02

TABELA C.5

$C_w = 65\%$

$S_o = 7,12 \text{ dina/cm}^2$

$D = 2,71 \text{ cm}$

$\eta = 2,17 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

fcalc Eq. (III.12)	Re* Eq. (III.10)	fcalc Eq. (III.32)	fexp fcalc	Re' Eq. (III.20)	fcalc Eq. (III.32)	fexp fcalc	Re <sub>B</sub> Eq. (III.41)	fcalc Eq. (III.40)	fexp fcalc
$8,21 \times 10^{-3}$	$7,46 \times 10^4$	$8,31 \times 10^{-3}$	0,99	$4,94 \times 10^4$	$8,44 \times 10^{-3}$	0,97	$2,14 \times 10^2$	$9,34 \times 10^{-3}$	0,88
$7,48 \times 10^{-3}$	$9,84 \times 10^4$	$8,24 \times 10^{-3}$	0,91	$7,08 \times 10^4$	$8,32 \times 10^{-3}$	0,90	$2,51 \times 10^2$	$7,97 \times 10^{-3}$	0,94
$6,60 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^5$	$8,19 \times 10^{-3}$	0,81	$9,85 \times 10^4$	$8,24 \times 10^{-3}$	0,80	$2,91 \times 10^2$	$6,87 \times 10^{-3}$	0,96
$1,21 \times 10^{-2}$	$6,06 \times 10^4$	$8,37 \times 10^{-3}$	1,45	$3,72 \times 10^4$	$8,56 \times 10^{-3}$	1,41	$1,90 \times 10^2$	$1,05 \times 10^{-2}$	1,15
$8,77 \times 10^{-3}$	$7,85 \times 10^4$	$8,29 \times 10^{-3}$	1,06	$5,27 \times 10^4$	$8,41 \times 10^{-3}$	1,04	$2,20 \times 10^2$	$9,07 \times 10^{-3}$	0,97
$8,49 \times 10^{-3}$	$8,34 \times 10^4$	$8,28 \times 10^{-3}$	1,03	$5,71 \times 10^4$	$8,39 \times 10^{-3}$	1,01	$2,28 \times 10^2$	$8,76 \times 10^{-3}$	0,97
$6,67 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^5$	$8,23 \times 10^{-3}$	0,81	$7,52 \times 10^4$	$8,30 \times 10^{-3}$	0,80	$2,57 \times 10^2$	$7,78 \times 10^{-3}$	0,86
$8,26 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^5$	$8,23 \times 10^{-3}$	1,00	$7,39 \times 10^4$	$8,31 \times 10^{-3}$	0,99	$2,55 \times 10^2$	$7,83 \times 10^{-3}$	1,05
$8,60 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^5$	$8,21 \times 10^{-3}$	1,05	$8,65 \times 10^4$	$8,27 \times 10^{-3}$	1,04	$7,30 \times 10^2$	$7,30 \times 10^{-3}$	1,18
$7,41 \times 10^{-3}$	$1,55 \times 10^5$	$8,17 \times 10^{-3}$	0,91	$1,24 \times 10^5$	$8,20 \times 10^{-3}$	0,90	$3,25 \times 10^2$	$6,16 \times 10^{-3}$	1,20



TABELA C.6

$C_w = 65\%$        $S_o = 7,12 \text{ dina/cm}^2$   
 $D = 5,22 \text{ cm}$        $\eta = 2,17 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

fexp Eq.(III.12)	Re* Eq.(III.10)	fcalc Eq.(III.32)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re' Eq.(III.20)	fcalc Eq.(III.32)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re <sub>B</sub> Eq.(III.41)	fcalc Eq.(III.40)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$
6,87x10 <sup>-3</sup>	1,12x10 <sup>5</sup>	6,84x10 <sup>-3</sup>	1,00	4,93x10 <sup>4</sup>	7,16x10 <sup>-3</sup>	0,96	2,20x10 <sup>2</sup>	0,09x10 <sup>-3</sup>	0,76
6,36x10 <sup>-3</sup>	2,04x10 <sup>5</sup>	6,71x10 <sup>-3</sup>	0,95	1,20x10 <sup>5</sup>	6,82x10 <sup>-3</sup>	0,93	3,10x10 <sup>2</sup>	6,45x10 <sup>-3</sup>	0,99
6,79x10 <sup>-3</sup>	1,87x10 <sup>5</sup>	6,72x10 <sup>-3</sup>	1,01	1,06x10 <sup>5</sup>	6,85x10 <sup>-3</sup>	0,99	2,96x10 <sup>2</sup>	6,77x10 <sup>-3</sup>	1,00
8,07x10 <sup>-3</sup>	1,58x10 <sup>5</sup>	6,75x10 <sup>-3</sup>	1,20	8,52x10 <sup>4</sup>	6,95x10 <sup>-3</sup>	1,16	2,68x10 <sup>2</sup>	7,46x10 <sup>-3</sup>	1,08
8,07x10 <sup>-3</sup>	1,42x10 <sup>5</sup>	6,78x10 <sup>-3</sup>	1,19	7,10x10 <sup>4</sup>	6,98x10 <sup>-3</sup>	1,15	2,52x10 <sup>2</sup>	7,92x10 <sup>-3</sup>	1,02
7,99x10 <sup>-3</sup>	1,54x10 <sup>5</sup>	6,79x10 <sup>-3</sup>	1,18	6,50x10 <sup>4</sup>	7,05x10 <sup>-3</sup>	1,14	2,44x10 <sup>2</sup>	8,19x10 <sup>-3</sup>	0,98
8,06x10 <sup>-3</sup>	1,20x10 <sup>5</sup>	6,82x10 <sup>-3</sup>	1,18	5,48x10 <sup>4</sup>	7,11x10 <sup>-3</sup>	1,13	2,29x10 <sup>2</sup>	8,74x10 <sup>-3</sup>	0,92
7,85x10 <sup>-3</sup>	1,11x10 <sup>5</sup>	6,84x10 <sup>-3</sup>	1,15	4,87x10 <sup>4</sup>	7,17x10 <sup>-3</sup>	1,09	2,19x10 <sup>2</sup>	9,14x10 <sup>-3</sup>	0,86
8,99x10 <sup>-3</sup>	1,02x10 <sup>5</sup>	6,86x10 <sup>-3</sup>	1,31	4,25x10 <sup>4</sup>	7,25x10 <sup>-3</sup>	1,24	2,09x10 <sup>2</sup>	9,59x10 <sup>-3</sup>	0,94
8,34x10 <sup>-3</sup>	1,78x10 <sup>5</sup>	6,73x10 <sup>-3</sup>	1,24	9,89x10 <sup>4</sup>	6,87x10 <sup>-3</sup>	1,21	2,87x10 <sup>2</sup>	6,97x10 <sup>-3</sup>	1,20
8,21x10 <sup>-3</sup>	1,63x10 <sup>5</sup>	6,75x10 <sup>-3</sup>	1,22	8,72x10 <sup>4</sup>	6,91x10 <sup>-3</sup>	1,19	2,75x10 <sup>2</sup>	7,33x10 <sup>-3</sup>	1,12
8,15x10 <sup>-3</sup>	1,49x10 <sup>5</sup>	6,77x10 <sup>-3</sup>	1,20	7,64x10 <sup>4</sup>	6,96x10 <sup>-3</sup>	1,17	2,60x10 <sup>2</sup>	7,69x10 <sup>-3</sup>	1,06
8,71x10 <sup>-3</sup>	1,25x10 <sup>5</sup>	6,81x10 <sup>-3</sup>	1,28	5,84x10 <sup>4</sup>	7,07x10 <sup>-3</sup>	1,23	2,34x10 <sup>2</sup>	8,54x10 <sup>-3</sup>	1,02
8,61x10 <sup>-3</sup>	1,11x10 <sup>5</sup>	6,84x10 <sup>-3</sup>	1,26	4,87x10 <sup>4</sup>	7,17x10 <sup>-3</sup>	1,20	2,19x10 <sup>2</sup>	9,14x10 <sup>-3</sup>	0,94
8,02x10 <sup>-3</sup>	1,05x10 <sup>5</sup>	6,85x10 <sup>-3</sup>	1,17	4,47x10 <sup>4</sup>	7,22x10 <sup>-3</sup>	1,11	2,15x10 <sup>2</sup>	9,40x10 <sup>-3</sup>	0,85
8,29x10 <sup>-3</sup>	9,51x10 <sup>4</sup>	6,89x10 <sup>-3</sup>	1,20	3,69x10 <sup>4</sup>	7,34x10 <sup>-3</sup>	1,13	1,99x10 <sup>2</sup>	1,01x10 <sup>-2</sup>	0,82
1,42x10 <sup>-2</sup>	5,98x10 <sup>4</sup>	7,06x10 <sup>-3</sup>	2,01	1,77x10 <sup>4</sup>	8,00x10 <sup>-3</sup>	1,78	1,54x10 <sup>2</sup>	1,50x10 <sup>-2</sup>	1,09
1,86x10 <sup>-2</sup>	3,98x10 <sup>4</sup>	7,29x10 <sup>-3</sup>	2,55	8,73x10 <sup>3</sup>	9,01x10 <sup>-3</sup>	2,06	1,22x10 <sup>2</sup>	1,63x10 <sup>-2</sup>	1,14
2,72x10 <sup>-2</sup>	1,97x10 <sup>4</sup>	7,88x10 <sup>-3</sup>	3,45	2,40x10 <sup>3</sup>	1,23x10 <sup>-2</sup>	2,21	8,18x10 <sup>1</sup>	2,44x10 <sup>-2</sup>	1,11
9,01x10 <sup>-3</sup>	1,08x10 <sup>5</sup>	6,85x10 <sup>-3</sup>	1,32	4,68x10 <sup>4</sup>	7,19x10 <sup>-3</sup>	1,25	2,16x10 <sup>2</sup>	9,25x10 <sup>-3</sup>	0,97

TABELA C.7

$C_w = 40\%$

$n = 0,895$

$D = 2,71\text{cm}$

$K = 0,036 \text{ dina s}^n/\text{cm}^2$

$S_o = 3,0 \text{ dina/cm}^2$

$\eta = 1,16 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	$f_{calc}$ Eq. (III.44)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.36)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	$f_{cal}$ Eq. (III.38)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$1,12 \times 10^{-2}$	$5,56 \times 10^4$	$4,70 \times 10^{-3}$	2,38	$8,61 \times 10^4$	$4,47 \times 10^{-3}$	2,51	$5,50 \times 10^4$	$4,14 \times 10^{-3}$	2,71
$9,22 \times 10^{-3}$	$7,45 \times 10^4$	$4,41 \times 10^{-3}$	2,09	$1,12 \times 10^5$	$4,20 \times 10^{-3}$	2,20	$7,45 \times 10^4$	$3,77 \times 10^{-3}$	2,45
$1,02 \times 10^{-2}$	$8,26 \times 10^4$	$4,31 \times 10^{-3}$	2,37	$1,23 \times 10^5$	$4,11 \times 10^{-3}$	2,48	$8,26 \times 10^4$	$3,65 \times 10^{-3}$	2,79
$1,14 \times 10^{-2}$	$8,05 \times 10^4$	$4,33 \times 10^{-3}$	2,63	$1,20 \times 10^5$	$4,13 \times 10^{-3}$	2,76	$8,05 \times 10^4$	$3,68 \times 10^{-3}$	3,10
$1,05 \times 10^{-2}$	$9,48 \times 10^4$	$4,18 \times 10^{-3}$	2,51	$1,40 \times 10^5$	$3,99 \times 10^{-3}$	2,63	$9,48 \times 10^4$	$3,49 \times 10^{-3}$	3,01
$1,10 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^5$	$4,13 \times 10^{-3}$	2,66	$1,47 \times 10^5$	$3,94 \times 10^{-3}$	2,79	$1,01 \times 10^5$	$3,42 \times 10^{-3}$	3,22
$8,57 \times 10^{-3}$	$1,21 \times 10^5$	$3,97 \times 10^{-3}$	2,16	$1,74 \times 10^5$	$3,79 \times 10^{-3}$	2,26	$1,21 \times 10^5$	$3,23 \times 10^{-3}$	2,65

TABELA C.8

$C_w = 40\%$

$n = 0,895$

$D = 5,22\text{cm}$

$K = 0,036 \text{ dina s}^n/\text{cm}^2$

$S_o = 3,0 \text{ dina/cm}^2$

$\eta = 1,16 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	$f_{cal}$ Eq. (III.44)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.36)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	$f_{calc}$ Eq. (III.38)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$7,43 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^4$	$4,82 \times 10^{-3}$	1,54	$8,87 \times 10^4$	$4,44 \times 10^{-3}$	1,67	$5,00 \times 10^4$	$3,23 \times 10^{-3}$	2,30
$7,10 \times 10^{-3}$	$6,41 \times 10^4$	$4,56 \times 10^{-3}$	1,56	$1,11 \times 10^5$	$4,21 \times 10^{-3}$	1,69	$6,41 \times 10^4$	$3,96 \times 10^{-3}$	1,76
$7,67 \times 10^{-3}$	$7,05 \times 10^4$	$4,46 \times 10^{-3}$	1,72	$1,21 \times 10^5$	$4,13 \times 10^{-3}$	1,86	$7,05 \times 10^4$	$3,84 \times 10^{-3}$	2,00
$8,43 \times 10^{-3}$	$8,08 \times 10^4$	$4,33 \times 10^{-3}$	1,95	$1,37 \times 10^5$	$4,01 \times 10^{-3}$	2,10	$8,08 \times 10^4$	$3,67 \times 10^{-3}$	2,30
$8,95 \times 10^{-3}$	$8,60 \times 10^4$	$4,27 \times 10^{-3}$	2,10	$1,45 \times 10^5$	$3,95 \times 10^{-3}$	2,27	$8,60 \times 10^4$	$3,60 \times 10^{-3}$	2,49
$7,20 \times 10^{-3}$	$1,03 \times 10^5$	$4,11 \times 10^{-3}$	1,75	$1,71 \times 10^5$	$3,80 \times 10^{-3}$	1,89	$1,03 \times 10^5$	$3,40 \times 10^{-3}$	2,12
$8,48 \times 10^{-3}$	$9,95 \times 10^4$	$4,14 \times 10^{-3}$	2,05	$1,66 \times 10^5$	$3,83 \times 10^{-3}$	2,21	$9,95 \times 10^4$	$3,44 \times 10^{-3}$	2,47
$7,77 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^5$	$4,04 \times 10^{-3}$	1,92	$1,83 \times 10^5$	$3,74 \times 10^{-3}$	2,08	$1,11 \times 10^5$	$3,32 \times 10^{-3}$	2,34
$8,05 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^5$	$3,99 \times 10^{-3}$	2,02	$1,93 \times 10^5$	$3,69 \times 10^{-3}$	2,18	$1,18 \times 10^5$	$3,25 \times 10^{-3}$	2,48
$8,47 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^5$	$3,90 \times 10^{-3}$	2,17	$2,13 \times 10^5$	$3,61 \times 10^{-3}$	2,35	$1,31 \times 10^5$	$3,15 \times 10^{-3}$	2,69
$9,26 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^5$	$3,70 \times 10^{-3}$	2,50	$2,70 \times 10^5$	$3,41 \times 10^{-3}$	2,72	$1,71 \times 10^5$	$2,89 \times 10^{-3}$	3,20
$8,31 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^5$	$3,80 \times 10^{-3}$	2,19	$2,40 \times 10^5$	$3,51 \times 10^{-3}$	2,37	$1,50 \times 10^5$	$3,01 \times 10^{-3}$	2,76
$9,49 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^5$	$3,81 \times 10^{-3}$	2,49	$2,37 \times 10^5$	$3,52 \times 10^{-3}$	2,70	$1,48 \times 10^5$	$3,03 \times 10^{-3}$	3,13
$2,13 \times 10^{-3}$	$1,49 \times 10^5$	$6,48 \times 10^{-3}$	3,29	$2,97 \times 10^4$	$5,76 \times 10^{-3}$	3,70	$1,49 \times 10^4$	$6,32 \times 10^{-3}$	3,37
$1,21 \times 10^{-2}$	$2,82 \times 10^4$	$5,52 \times 10^{-3}$	2,19	$5,28 \times 10^4$	$5,02 \times 10^{-3}$	2,41	$2,82 \times 10^4$	$5,15 \times 10^{-3}$	2,35

TABELA C.9

$C_w = 50\%$   
 $D = 2,71\text{cm}$

$n = 0,87$   
 $K = 0,06 \text{ dina s}^n/\text{cm}^2$   
 $S_o = 4,37 \text{ dina}/\text{cm}^2$   
 $\eta = 1,36 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	$f_{calc}$ Eq. (III.44)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.36)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	$f_{calc}$ Eq. (III.38)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$9,24 \times 10^{-3}$	$4,72 \times 10^4$	$4,78 \times 10^{-3}$	1,93	$8,77 \times 10^4$	$4,41 \times 10^{-3}$	2,10	$4,72 \times 10^4$	$4,86 \times 10^{-3}$	1,90
$8,54 \times 10^{-3}$	$6,12 \times 10^4$	$4,51 \times 10^{-3}$	1,89	$1,10 \times 10^5$	$4,19 \times 10^{-3}$	2,04	$6,12 \times 10^4$	$3,74 \times 10^{-3}$	2,28
$9,33 \times 10^{-3}$	$6,32 \times 10^4$	$4,47 \times 10^{-3}$	2,09	$1,14 \times 10^5$	$4,16 \times 10^{-3}$	2,24	$6,32 \times 10^4$	$3,70 \times 10^{-3}$	2,52
$7,46 \times 10^{-3}$	$7,97 \times 10^4$	$4,25 \times 10^{-3}$	1,76	$1,38 \times 10^5$	$3,97 \times 10^{-3}$	1,88	$7,97 \times 10^4$	$3,41 \times 10^{-3}$	2,19
$7,08 \times 10^{-3}$	$9,09 \times 10^4$	$4,13 \times 10^{-3}$	1,71	$1,57 \times 10^5$	$3,86 \times 10^{-3}$	1,83	$9,09 \times 10^4$	$3,27 \times 10^{-3}$	2,17
$8,57 \times 10^{-3}$	$6,68 \times 10^4$	$4,42 \times 10^{-3}$	1,94	$1,19 \times 10^5$	$4,11 \times 10^{-3}$	2,09	$6,68 \times 10^4$	$3,63 \times 10^{-3}$	2,36

TABELA C.10

$C_w = 50\%$

$n = 0,87$

$D = 5,22\text{cm}$

$K = 0,06 \text{ dina/s}^n/\text{cm}^2$

$S_o = 4,37 \text{ dina/cm}^2$

$\eta = 1,36 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	$f_{calc}$ Eq. (III.44)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.36)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	$f_{calc}$ Eq. (III.38)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$7,35 \times 10^{-3}$	$7,51 \times 10^4$	$4,30 \times 10^{-3}$	1,71	$1,54 \times 10^5$	$3,88 \times 10^{-3}$	1,89	$7,51 \times 10^4$	$3,48 \times 10^{-3}$	2,11
$7,79 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^5$	$3,79 \times 10^{-3}$	2,06	$2,61 \times 10^5$	$3,43 \times 10^{-3}$	2,27	$1,36 \times 10^5$	$2,85 \times 10^{-3}$	2,73
$8,15 \times 10^{-3}$	$1,15 \times 10^5$	$3,92 \times 10^{-3}$	2,08	$2,24 \times 10^5$	$3,56 \times 10^{-3}$	2,29	$1,15 \times 10^5$	$3,01 \times 10^{-3}$	2,71
$8,09 \times 10^{-3}$	$1,07 \times 10^5$	$3,99 \times 10^{-3}$	2,03	$2,10 \times 10^5$	$3,61 \times 10^{-3}$	2,24	$1,07 \times 10^5$	$3,09 \times 10^{-3}$	2,62
$8,00 \times 10^{-3}$	$9,76 \times 10^4$	$4,07 \times 10^{-3}$	1,97	$1,94 \times 10^5$	$3,68 \times 10^{-3}$	2,17	$9,76 \times 10^4$	$3,19 \times 10^{-3}$	2,51
$8,10 \times 10^{-3}$	$8,82 \times 10^4$	$4,16 \times 10^{-3}$	1,95	$1,77 \times 10^5$	$3,75 \times 10^{-3}$	2,16	$8,82 \times 10^4$	$3,30 \times 10^{-3}$	2,45
$8,32 \times 10^{-3}$	$7,61 \times 10^4$	$4,29 \times 10^{-3}$	1,94	$1,55 \times 10^5$	$3,87 \times 10^{-3}$	2,15	$7,61 \times 10^4$	$3,47 \times 10^{-3}$	2,40
$8,10 \times 10^{-3}$	$7,47 \times 10^4$	$4,31 \times 10^{-3}$	1,88	$1,53 \times 10^5$	$3,88 \times 10^{-3}$	2,09	$7,47 \times 10^4$	$3,49 \times 10^{-3}$	2,32
$8,91 \times 10^{-3}$	$6,42 \times 10^4$	$4,46 \times 10^{-3}$	2,00	$1,34 \times 10^5$	$4,00 \times 10^{-3}$	2,23	$6,42 \times 10^4$	$3,68 \times 10^{-3}$	2,42
$8,77 \times 10^{-3}$	$5,64 \times 10^4$	$4,59 \times 10^{-3}$	1,91	$1,19 \times 10^5$	$4,11 \times 10^{-3}$	2,13	$5,64 \times 10^4$	$3,84 \times 10^{-3}$	2,28
$1,08 \times 10^{-2}$	$4,23 \times 10^4$	$4,91 \times 10^{-3}$	2,20	$9,24 \times 10^4$	$4,36 \times 10^{-3}$	2,48	$4,23 \times 10^4$	$4,24 \times 10^{-3}$	2,55
$1,13 \times 10^{-2}$	$3,32 \times 10^4$	$5,20 \times 10^{-3}$	2,17	$7,45 \times 10^4$	$4,58 \times 10^{-3}$	2,47	$3,32 \times 10^4$	$4,60 \times 10^{-3}$	2,46
$1,60 \times 10^{-2}$	$2,16 \times 10^4$	$5,78 \times 10^{-3}$	2,77	$5,09 \times 10^4$	$5,01 \times 10^{-3}$	3,19	$2,16 \times 10^4$	$5,32 \times 10^{-3}$	3,01
$1,54 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^4$	$6,02 \times 10^{-3}$	2,56	$4,41 \times 10^4$	$5,17 \times 10^{-3}$	2,98	$1,83 \times 10^4$	$5,63 \times 10^{-3}$	2,74
$1,87 \times 10^{-2}$	$1,34 \times 10^4$	$6,53 \times 10^{-3}$	2,86	$3,33 \times 10^4$	$5,52 \times 10^{-3}$	3,39	$6,26 \times 10^4$	$6,26 \times 10^{-3}$	2,99

TABELA C.11

$C_w = 65\%$

$n = 0,82$

$D = 2,71\text{cm}$

$K = 0,11 \text{ dina s}^n/\text{cm}^2$

$S_o = 7,12 \text{ dina}/\text{cm}^2$

$\eta = 2,17 \times 10^{-2} \text{ Poise}$

$f_{exp}$ Eq. (III.12)	$Re_{M.R.}$ Eq. (III.16)	$f_{calc}$ Eq. (III.44)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re^*$ Eq. (III.10)	$f_{calc}$ Eq. (III.36)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$	$Re_{S.M.}$ Eq. (III.14)	$f_{calc}$ Eq. (III.38)	$\frac{f_{exp}}{f_{calc}}$
$8,21 \times 10^{-3}$	$4,95 \times 10^4$	$4,53 \times 10^{-3}$	1,81	$7,46 \times 10^4$	$4,46 \times 10^{-3}$	1,84	$4,95 \times 10^4$	$3,41 \times 10^{-3}$	2,41
$7,48 \times 10^{-3}$	$6,86 \times 10^4$	$4,20 \times 10^{-3}$	1,78	$9,84 \times 10^4$	$4,20 \times 10^{-3}$	1,78	$6,86 \times 10^4$	$3,01 \times 10^{-3}$	2,49
$6,60 \times 10^{-3}$	$9,35 \times 10^4$	$3,92 \times 10^{-3}$	1,68	$1,28 \times 10^5$	$3,97 \times 10^{-3}$	1,66	$9,35 \times 10^4$	$2,68 \times 10^{-3}$	2,46
$1,21 \times 10^{-2}$	$3,87 \times 10^4$	$4,80 \times 10^{-3}$	2,52	$6,06 \times 10^4$	$4,67 \times 10^{-3}$	2,59	$3,87 \times 10^4$	$3,75 \times 10^{-3}$	3,23
$8,77 \times 10^{-3}$	$5,25 \times 10^4$	$4,46 \times 10^{-3}$	1,97	$7,85 \times 10^4$	$4,41 \times 10^{-3}$	1,99	$5,25 \times 10^4$	$3,34 \times 10^{-3}$	2,63
$8,49 \times 10^{-3}$	$5,64 \times 10^4$	$4,38 \times 10^{-3}$	1,93	$8,34 \times 10^4$	$4,36 \times 10^{-3}$	1,95	$5,64 \times 10^4$	$3,25 \times 10^{-3}$	2,61
$6,67 \times 10^{-3}$	$7,22 \times 10^4$	$4,15 \times 10^{-3}$	1,61	$4,16 \times 10^5$	$4,16 \times 10^{-3}$	1,60	$7,22 \times 10^4$	$2,95 \times 10^{-3}$	2,26
$8,26 \times 10^{-3}$	$7,12 \times 10^4$	$4,16 \times 10^{-3}$	1,99	$1,02 \times 10^5$	$4,17 \times 10^{-3}$	1,98	$7,12 \times 10^4$	$2,97 \times 10^{-3}$	2,78
$8,60 \times 10^{-3}$	$8,24 \times 10^4$	$4,03 \times 10^{-3}$	2,03	$1,15 \times 10^5$	$4,07 \times 10^{-3}$	2,11	$8,24 \times 10^4$	$2,81 \times 10^{-3}$	3,06
$7,41 \times 10^{-3}$	$1,17 \times 10^5$	$3,73 \times 10^{-3}$	1,99	$1,55 \times 10^5$	$3,81 \times 10^{-3}$	1,94	$1,17 \times 10^5$	$2,46 \times 10^{-3}$	3,01

TABELA C.12

 $C_w = 65\%$  $n = 0,82$  $K = 0,11 \text{ dina s}^n / \text{cm}^2$  $D = 5,22 \text{ cm}$  $S_0 = 7,12 \text{ dina/cm}^2$  $\eta = 2,17 \times 10^{-2} \text{ Poise}$ 

fexp Eq.(III.12)	Re <sub>M.R.</sub> Eq.(III.16)	fcalc Eq.(III.44)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re*	fcalc Eq.(III.36)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$	Re <sub>S.M.</sub> Eq.(III.14)	fcalc Eq.(III.38)	$\frac{\text{fexp}}{\text{fcalc}}$
6,87x10 <sup>-3</sup>	4	4,28x10 <sup>-3</sup>	1,61	1,12x10 <sup>5</sup>	4,09x10 <sup>-3</sup>	1,68	6,29x10 <sup>4</sup>	5,11x10 <sup>-3</sup>	2,21
6,36x10 <sup>-3</sup>	5	5,66x10 <sup>-3</sup>	1,74	2,04x10 <sup>5</sup>	3,59x10 <sup>-3</sup>	1,77	1,28x10 <sup>5</sup>	2,37x10 <sup>-3</sup>	2,68
6,79x10 <sup>-3</sup>	5	3,74x10 <sup>-3</sup>	1,82	1,87x10 <sup>5</sup>	3,66x10 <sup>-3</sup>	1,86	1,16x10 <sup>5</sup>	2,46x10 <sup>-3</sup>	2,60
8,07x10 <sup>-3</sup>	4	3,91x10 <sup>-3</sup>	2,06	1,58x10 <sup>5</sup>	3,80x10 <sup>-3</sup>	2,12	9,48x10 <sup>4</sup>	2,66x10 <sup>-3</sup>	3,03
8,07x10 <sup>-3</sup>	4	4,02x10 <sup>-3</sup>	2,01	1,42x10 <sup>5</sup>	3,89x10 <sup>-3</sup>	2,07	8,36x10 <sup>4</sup>	2,79x10 <sup>-3</sup>	2,89
7,99x10 <sup>-3</sup>	4	4,08x10 <sup>-3</sup>	1,96	1,54x10 <sup>5</sup>	3,93x10 <sup>-3</sup>	2,03	7,81x10 <sup>4</sup>	2,87x10 <sup>-3</sup>	2,78
8,06x10 <sup>-3</sup>	4	4,20x10 <sup>-3</sup>	1,92	1,20x10 <sup>5</sup>	4,03x10 <sup>-3</sup>	2,00	6,83x10 <sup>4</sup>	3,02x10 <sup>-3</sup>	2,67
7,85x10 <sup>-3</sup>	4	4,29x10 <sup>-3</sup>	1,85	1,11x10 <sup>5</sup>	4,10x10 <sup>-3</sup>	1,91	6,23x10 <sup>4</sup>	3,15x10 <sup>-3</sup>	2,51
8,99x10 <sup>-3</sup>	4	4,38x10 <sup>-3</sup>	2,09	1,02x10 <sup>5</sup>	4,17x10 <sup>-3</sup>	2,16	5,64x10 <sup>4</sup>	3,25x10 <sup>-3</sup>	2,77
8,34x10 <sup>-3</sup>	5	3,79x10 <sup>-3</sup>	2,20	1,78x10 <sup>5</sup>	3,70x10 <sup>-3</sup>	2,25	1,09x10 <sup>5</sup>	2,52x10 <sup>-3</sup>	3,31
8,21x10 <sup>-3</sup>	4	3,87x10 <sup>-3</sup>	2,12	1,63x10 <sup>5</sup>	3,77x10 <sup>-3</sup>	2,18	9,84x10 <sup>4</sup>	2,62x10 <sup>-3</sup>	3,13
8,13x10 <sup>-3</sup>	4	3,96x10 <sup>-3</sup>	2,05	1,49x10 <sup>5</sup>	3,85x10 <sup>-3</sup>	2,11	8,88x10 <sup>4</sup>	2,75x10 <sup>-3</sup>	2,98
8,71x10 <sup>-3</sup>	4	4,16x10 <sup>-3</sup>	2,09	1,25x10 <sup>5</sup>	3,99x10 <sup>-3</sup>	2,18	7,16x10 <sup>4</sup>	2,96x10 <sup>-3</sup>	2,94
8,61x10 <sup>-3</sup>	4	4,29x10 <sup>-3</sup>	2,01	1,11x10 <sup>5</sup>	4,10x10 <sup>-3</sup>	2,10	6,23x10 <sup>4</sup>	3,15x10 <sup>-3</sup>	2,75
8,02x10 <sup>-3</sup>	4	4,35x10 <sup>-3</sup>	1,84	1,05x10 <sup>5</sup>	4,15x10 <sup>-3</sup>	1,93	5,87x10 <sup>4</sup>	3,20x10 <sup>-3</sup>	2,51
8,29x10 <sup>-3</sup>	4	4,50x10 <sup>-3</sup>	1,84	9,31x10 <sup>4</sup>	4,26x10 <sup>-3</sup>	1,95	5,09x10 <sup>4</sup>	3,58x10 <sup>-3</sup>	2,45
1,42x10 <sup>-2</sup>	4	5,10x10 <sup>-3</sup>	2,78	5,98x10 <sup>4</sup>	4,68x10 <sup>-3</sup>	3,03	3,01x10 <sup>4</sup>	4,15x10 <sup>-3</sup>	3,44
1,86x10 <sup>-2</sup>	4	5,75x10 <sup>-3</sup>	3,23	3,98x10 <sup>4</sup>	5,11x10 <sup>-3</sup>	3,64	1,87x10 <sup>4</sup>	4,95x10 <sup>-3</sup>	3,76
2,72x10 <sup>-2</sup>	3	7,21x10 <sup>-3</sup>	3,77	1,97x10 <sup>4</sup>	5,94x10 <sup>-3</sup>	4,58	8,12x10 <sup>3</sup>	6,81x10 <sup>-3</sup>	3,99
9,01x10 <sup>-3</sup>	4	4,32x10 <sup>-3</sup>	2,09	1,08x10 <sup>5</sup>	4,12x10 <sup>-3</sup>	2,19	6,06x10 <sup>4</sup>	5,16x10 <sup>-3</sup>	2,85