

GERALDO JOSÉ FORMAGGIO

Engº de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1976.

*PROJETO, CONSTRUÇÃO E ENSAIO DE UM
VISCOSÍMETRO CAPILAR.*

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia de Alimentos e
Agrícola da UNICAMP para
obtenção do Título de Mestre
em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
Professor Assistente-Doutor do Departamento
de Engenharia de Alimentos da
Faculdade de Engenharia de Alimentos
e Agrícola da UNICAMP.

Campinas (SP), 1982

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Emílio e Tercília

*e a minha esposa e filhos: Maria Ivani, Francisco José
e Maurício Daniel.*

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão às seguintes pessoas e instituições:

- *Nelson Bolzani, chefe da Seção Técnica do Centro de Tecnologia da UNICAMP.*
- *Sérgio Roberto Dall'Oca, professor da FEAA da UNICAMP.*
- *Theo Gunter Kieckbusch, professor da FEAA da UNICAMP.*
- *Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*
- *Centro de Tecnologia da UNICAMP.*

ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto

RESUMO

Foi projetado, construído e ensaiado um reômetro do tipo capilar que funciona acoplado à máquina de ensaios universais INSTRON modelo 1130. O reômetro é constituído basicamente de um reservatório que contém o material a ser ensaiado e de um tubo capilar através do qual o material deve escoar com vazão constante em regime permanente e laminar para que seja determinada a perda de carga nesse escoamento, o que vai possibilitar o cálculo da tensão de cisalhamento enquanto que a vazão permite calcular a taxa de deformação. Uma combinação de velocidades diferentes de acionamento da máquina de ensaios com um conjunto de tubos com diferentes comprimentos e diferentes diâmetros fornece as variáveis, tensão de cisalhamento e taxa de deformação, que possibilitam o ajuste de um certo modelo de comportamento reológico ao material ensaiado.

A faixa de trabalho do reômetro é bastante ampla e permite ensaios com taxas de deformação variando desde 3 s^{-1} até 60.000 s^{-1} , com fluidos que tenham viscosidade aparente desde $1,0 \text{ cP}$ até $2,5 \cdot 10^5 \text{ cP}$.

Os ensaios foram conduzidos utilizando-se três diferentes fluidos: óleo lubrificante SAE 40 e glicerina que apresentaram comportamento Newtoniano e uma solução aquosa a 3% em peso de CMC que apresentou comportamento pseudoplástico.

Os resultados obtidos foram analisados através de dois parâmetros estatísticos: coeficiente de correlação " r^2 " e distribuição de probabilidade 'F' de Snedecor. Pela análise estatística

ca foi possível concluir que o reômetro projetado é de alta confiabilidade pelo desempenho e qualidade dos parâmetros reológicos obtidos.

SUMMARY

A capillary type rheometer which operates coupled to the universal testing machine INSTRON model 1130, was designed, built and tested. The rheometer has basically a reservoir that contain the testing material and a capillary tube through which the material has to flow steadily at a constant rate and laminar regime in order to detect the pressure drop that gives the shearing stress mean while the flow rate enhances the determination of the shear rate. A combination of several different speeds of the testing machine together with the tubes of different lenght and diameter gives the parameters shear stress and shear rate that lead to adjust a model of rheological behaviour to the material under test.

The rheometer has a wide range of operation with shear rate ranging from 3 s^{-1} to $60,000 \text{ s}^{-1}$, and fluids with apparent viscosity ranging from 1.0 cP to $2.5 \cdot 10^5 \text{ cP}$.

Tests were conducted with three different fluids: lubricating oil SAE 40 and glycerin that behaved as Newtonian and an aqueous solution 3% by weight of CMC that presented a pseudoplastic behaviour.

Results were analysed through two statistical parameters: correlation ratio " r^2 " and Snedecor distribution coefficient "F". The statistical analysis led to the conclusion that the rheometer designed presents an high degree of confidence by the performance presented and the quality of the rheological parameters obtained.

ÍNDICE

	pg.
NOTAÇÃO PRINCIPAL	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Comportamento dos fluidos reais	
2.2. Principais tipos de viscosímetros	
2.3. Aplicações e limitações de alguns viscosímetros comerciais	
2.3.1. HAAKE ROTOVISKO	
2.3.2. EPPRECHT RHEOMAT	
2.3.3. BROOKFIELD SYNCHRO-ELECTRIC	
2.3.4. FERRANTI SHIRLEY	
2.3.5. OSTWALD	
2.3.6. CANON-FENSKE	
2.3.7. INSTRON RHEOMETER	
2.3.8. REDWOOD, SAYBOLT e ENGLER	
2.3.9. HOPPLER	
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1. Dimensionamento do viscosímetro capilar de pressão variável	
3.2. Procedimento experimental	
3.3. Análise dos resultados experimentais	
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
a. Ajuste do modelo aos dados experimentais	

b. Influência do fator $1/d$ na determinação dos parâmetros do modelo.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES	59
6. APÊNDICE	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

NOTAÇÃO PRINCIPAL

SÍMBOLO

SIGNIFICADO

A	constante nos modelos reológicos da Tabela 1.
B	constante nos modelos reológicos da Tabela 1.
C	constante nos modelos reológicos da Tabela 1 e constante da Equação (28).
D	diâmetro do reservatório.
d	diâmetro interno do capilar
F	força (que atua na placa ou no pistão)
F_o	força
'P'	distribuição de probabilidade de Snedecor
hc	altura do cilindro
K	índice de consistência aparente
K'	índice de consistência real
L	comprimento do capilar
L'	comprimento do cilindro (reservatório)
le	comprimento de entrada
n	índice de comportamento do escoamento do modelo de Ostwald-de Waele
P	pressão no capilar
Q	vazão volumétrica
R	raio do capilar
Rp	raio do prato das equações 23 e 25
Rs	raio da esfera das equações 26 e 27
R1	raio do cilindro das equações 18 a 22
R2	raio do copo das equações 18 a 22
r	raio e coordenada de sistema de referência

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
r^2	raio de correlação
T	torque
V	velocidade do pistão ou da placa
v	velocidade do fluido
v_b	velocidade média do fluido
v_s	velocidade da esfera
x	coordenada de sistema de referência
y	coordenada de sistema de referência ou distancia entre placas
z	coordenada de sistema de referência
α	constante nos modelos reológicos da Tabela 1 e parâmetro estatístico das Equações 48 a 52
$\bar{\alpha}$	parâmetro estatístico das Equações 48 a 52
$\hat{\alpha}_i$	parâmetro estatístico das Equações 48 a 52
$\dot{\gamma}$	taxa de deformação ou gradiente de velocidade
$\dot{\gamma}_w$	taxa de deformação real na parede
$\dot{\gamma}_{ap,w}$	taxa de deformação aparente na parede
η	viscosidade aparente
μ	viscosidade
μ_0	constante nos modelos reológicos da Tabela 1.
μ_∞	constante nos modelos reológicos da Tabela 1.
π	número Pi
ρ_f	massa específica do fluido
ρ_s	massa específica da esfera
τ	tensão de cisalhamento
τ_0	tensão inicial para escoamento e constante dos modelos reológicos da Tabela 2.

SÍMBOLO

SIGNIFICADO

τ_w	tensão de cisalhamento na parede
τ_{rz}	tensão de cisalhamento na direção z, agindo sobre o plano r.
τ_{yx}	tensão de cisalhamento na direção x, agindo sobre o plano y
ψ_a	ângulo do cone das equações 23 e 24
Ω_a	velocidade angular das equações 18 a 24

SÍMBOLOS COMBINADOS

$-dv/dr$	taxa de deformação em coordenadas cilíndricas
$-dv/dz$	taxa de deformação em coordenadas cartesianas
$(-dv/dr)_w$	taxa de deformação na parede em coordenadas cilíndricas
$(-dv/dt)_w$	taxa de deformação na parede em coordenadas cartesianas

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Desenvolvimento do perfil de velocidade em regime laminar e estado estacionário para um fluido confinado entre duas placas planas e paralelas.
Pg. 04
- FIGURA 2 - Curvas de escoamento para fluidos puramente viscosos independentes do tempo.
Pg. 06
- FIGURA 3 - Comportamento característico para fluidos dependentes do tempo.
Pg. 10
- FIGURA 4 - Deformação de um fluido nos principais tipos de viscosímetros.
Pg. 12
- FIGURA 5 - Esquema do viscosímetro utilizado neste trabalho.
Pg. 22
- FIGURA 6 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para óleo de motor e $l/d = 93,9$.
Pg. 37
- FIGURA 7 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para óleo de motor e $l/d = 187,8$
Pg. 39
- FIGURA 8 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para óleo de motor e $l/d = 281,6$
Pg. 41
- FIGURA 9 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para glicerina e $l/d = 61,3$
Pg. 43
- FIGURA 10 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para glicerina e $l/d = 122,5$
Pg. 45
- FIGURA 11 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para glicerina e $l/d = 182,8$
Pg. 47

FIGURA 12 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para solução de CMC a 3% e
Pg. 49 $l/d = 61,3$.

FIGURA 13 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para solução de CMC a 3% e
Pg. 51 $l/d = 122,5$.

FIGURA 14 - τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para solução de CMC a 3% e
Pg. 53 $l/d = 183,8$.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Modelos empíricos que relacionam τ_{yx} com dv_x/dy para
Pg. 07 fluidos que não necessitam de tensão inicial para escoar.

TABELA 2 - Modelos empíricos para fluidos que necessitam de ten
Pg. 09 são inicial para escoar.

TABELA 3 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para $\underline{\bar{o}}$
Pg. 36 leo de motor com um capilar de $l/d = 93,9$

TABELA 4 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para $\underline{\bar{o}}$
Pg. 38 leo de motor com um capilar de $l/d = 187,8$

TABELA 5 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para $\underline{\bar{o}}$
Pg. 40 leo de motor com um capilar de $l/d = 281,6$

TABELA 6 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 42 glicerina com um capilar de $l/d = 61,3$

TABELA 7 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 44 glicerina com um capilar de $l/d = 122,5$.

TABELA 8 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 46 glicerina com um capilar de $l/d = 183,8$

TABELA 9 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 48 solução de CMC 3% com um capilar de $l/d = 61,3$

TABELA 10 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 50 solução de CMC a 3% com um capilar de $l/d = 122,5$.

FIGURA 11 - τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ e N_{Re} calculados a partir de F e V para
Pg. 52 solução de CMC a 3% com um capilar de $l/d = 183,8$

TABELA 12 - K , n , r^2 e ' F ' para óleo de motor a $22^\circ C$ para 3 ca-
Pg. 54 pilares com l/d entre 93,9 a 231,6.

TABELA 13 - K , n , r^2 e ' F ' para glicerina a $21^\circ C$ para 3 capila-
Pg. 55 res com l/d entre 61,3 e 183,8.

TABELA 14 - K , n , r^2 e ' F ' para solução de CMC a 3% para 3 capi-
Pg. 56 lares com l/d entre 61,3 a 183,8.

TABELA A₀ - Faixas de trabalho possíveis para o sistema de capi-
Pg. 63 lares considerando um fluido com $K = 100$ e $n = 0,50$.

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade e procura de parâmetros reológicos para os diversos fluidos manipulados nas indústrias de processamento está ligada à grande importância econômica que estes fluidos e equipamentos de manipulação representam atualmente. Razões econômicas impõem a necessidade de otimização. As informações sobre o comportamento reológico dos fluidos permitem o cálculo prático para situações importantes como: configurações dos escoamentos, perdas de carga, potência necessária para bombeamentos, bem como o tipo ideal de bomba a ser usada, dados sobre agitação e mistura, velocidade de transferência de calor e outras operações importantes envolvidas no processamento, Astarita (1); Bird et al. (2), Bowen Jr. (3), Brodkey (4), Christiansen (6), Skelland (24).

Muitos desses fluidos são do tipo não-Newtoniano, pois sua viscosidade aparente mostra alguma dependência com certas características dos escoamentos. Torna-se então necessário medir a viscosidade em diferentes situações de modo a se obter um reograma no qual está a dependência procurada. Existem diversos aparelhos de medida nos quais é possível variar a taxa de deformação para a determinação dos parâmetros reológicos dos fluidos, Sherman (23), Van Wazer (27). Dentre eles destaca-se o viscosímetro de tubo capilar que pode ser utilizado praticamente para qualquer tipo de fluido e que apresenta a vantagem de utilizar uma situação real de escoamento numa tubulação, Coleman (8); Palomino (16); Saravacos (20, 21); Stratton (26); Van Wazer (27).

Neste trabalho foi projetado, construído e ensaiado um

viscosímetro do tipo capilar e de alta confiabilidade pelo desempenho que apresentou. O sistema de tubos capilares foi acoplado à máquina INSTRON 1130 de ensaios universais, o que possibilita obter-se vazões controladas e a medida precisa das perdas (força).

É importante salientar que o sistema construído tem limitações impostas pela disponibilidade de tubos capilares no mercado; pelas velocidades do sistema de acionamento e os limites para as perdas que são de 50 Kgf e de 500 Kgf para cada célula de carga disponível.

Procurou-se escolher capilares cujos diâmetros combinados com as velocidades disponíveis pudessem fornecer um gama de taxas de deformação, que recobrissem a faixa usualmente encontrada na prática e, que estão compreendidas entre um mínimo de 3 s^{-1} até um máximo de 60.000 s^{-1} , Coury (7); Harper (11), Holdsworth (12, 13); Mizrahi (15); Palomino (16); Rao (18); Wirtw (29).

Quanto a faixa de trabalho para o caso Newtoniano, o sistema pode ensaiar fluidos com viscosidade desde 1 cP até $2,5 \cdot 10^5$ cP. Para os casos não-Newtonianos, considerando-se o modelo de Ostwald-de Waele, o equipamento tem capacidade para ensaiar fluidos com índice de consistência entre 10 e $4,0 \cdot 10^4$ quando o valor de n for igual a 0,1 e entre 0,02 e $2,0 \cdot 10^3$ quando n for igual a 0,9. Para outros valores de n tem-se consequentemente outras faixas para os valores do índice de consistência do fluido em questão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Comportamento dos Fluidos Reais

Considere-se um fluido contido entre duas placas planas e paralelas de área S , separadas entre si de uma distância Y , como ilustrado na Figura 1, sendo que a placa superior é fixa, Bird et al. (2) e Skelland (24).

Supondo que o sistema esteja em repouso e no instante $t=0$ a placa inferior se movimenta na direção X com velocidade constante V , enquanto que a superior é fixa. Com o passar do tempo se estabelece um perfil de velocidade em regime permanente e para se manter esse movimento é necessário uma força F atuando sobre a placa inferior.

Sendo o escoamento laminar e portanto $dV/dY = \text{constante}$, essa força pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{F}{S} = -\mu \frac{V}{Y} \quad (1)$$

Observa-se que a força por unidade de área (tensão de cisalhamento) é proporcional ao decréscimo de velocidade na direção Y , sendo $\frac{\Delta V}{\Delta y}$ a taxa de deformação e a constante de proporcionalidade é a chamada 'Viscosidade do fluido'.

A tensão de cisalhamento atuando na direção ' x ' para um dado Y constante é representada por τ_{yx} e a componente x do vetor velocidade do fluido é representado por V_x . A Equação (1) pode então ser reescrita na seguinte forma diferencial:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad (2)$$

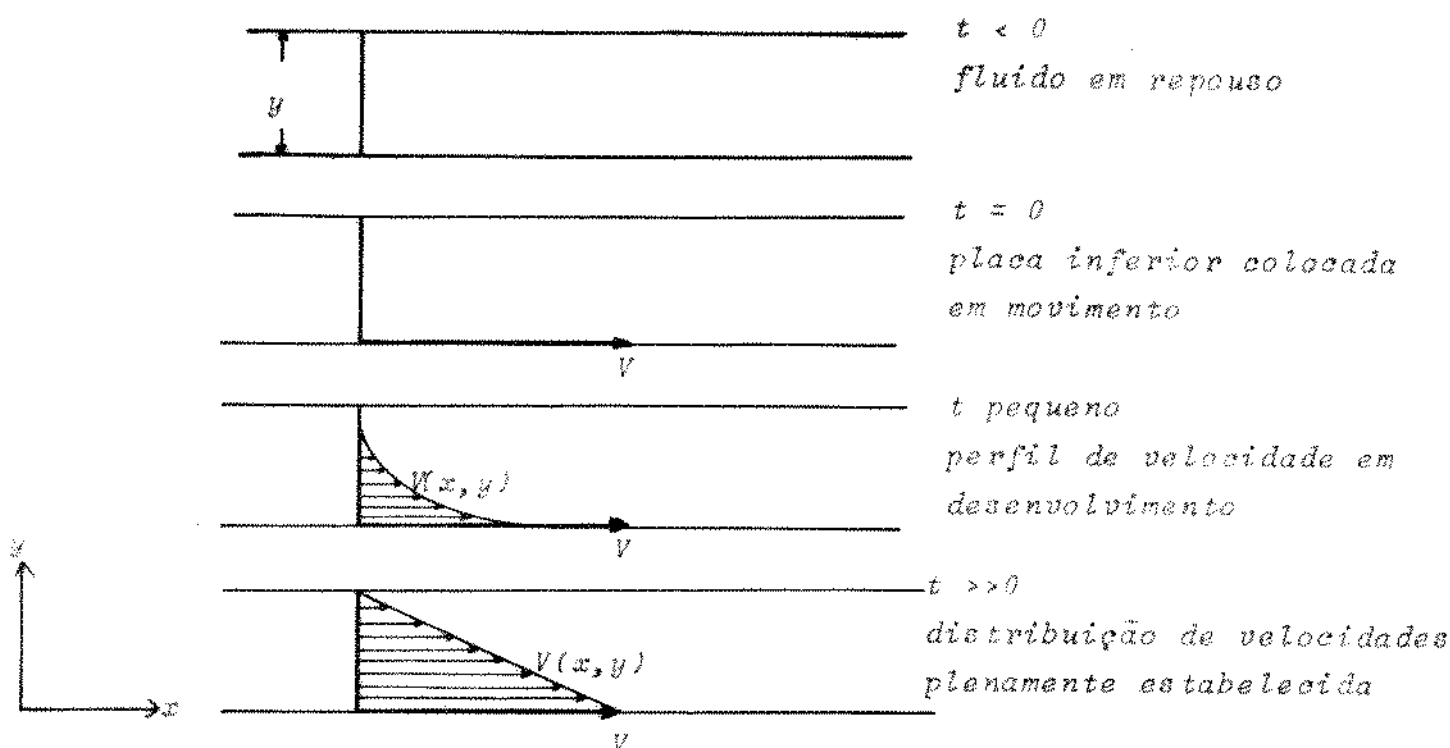


FIGURA 1 - DESENVOLVIMENTO DO PERFIL DE VELOCIDADE EM REGIME LAMINAR E ESTADO ESTACIONÁRIO PARA UM FLUIDO CONFINADO ENTRE DUAS PLACAS PLANAS PARALELAS

A equação (2) é conhecida como a lei de Viscosidade de Newton e os fluidos que seguem esta lei são denominados 'Newtonianos'. O comportamento Newtoniano é característico de todos os gases, muitos líquidos, soluções de baixo peso molecular, desde que as taxas de deformação a que estão submetidas não sejam extremamente baixas ou altas.

Todos os fluidos, para os quais a curva de escoamento (τ_{yx} versus dV_x/dy) não é linear e/ou não passa pela origem (para uma dada pressão e temperatura) são ditos não-Newtonianos e alguns exemplos estão representados na Figura (2).

Os fluidos reais podem ser classificados segundo três grandes grupos:

a) fluidos puramente viscosos não dependentes do tempo - são a-

queles para os quais é possível estabelecer uma relação unívoca entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, sendo que essa relação é independente da história do fluido. Neste grupo enquadram-se os fluidos Newtonianos;

b) Fluidos puramente viscosos dependentes do tempo - são aqueles que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação é dependente da história do fluido;

c) Fluidos viscoelásticos - são aqueles que apresentam como características tanto de fluidos como de sólidos elásticos e de um modo geral são dependentes do tempo.

Uma boa discussão evidenciando as peculiaridades de alguns tipos de fluidos foi apresentada por Bird et al.(2). Muitos livros textos dedicam algum espaço à classificação reológica dos fluidos, entre eles podem ser citados Brodkey (4), Middleman (14), Skelland (24) e Van Wazer (27).

Os materiais que se enquadram no primeiro grupo, os puramente viscosos independentes do tempo, podem ser divididos em dois grandes sub grupos: aqueles que necessitam de uma tensão inicial τ_0 para que comecem a escoar e que não necessitam dessa tensão inicial. Estes últimos são classificados em Newtonianos, pseudoplásticos e dilatantes. A maioria dos fluidos não-Newtonianos pertencem a categoria dos pseudoplásticos.

Alguns modelos empíricos propostos para relacionar a taxa de deformação com a tensão de cisalhamento são apresentados na Tabela (1).

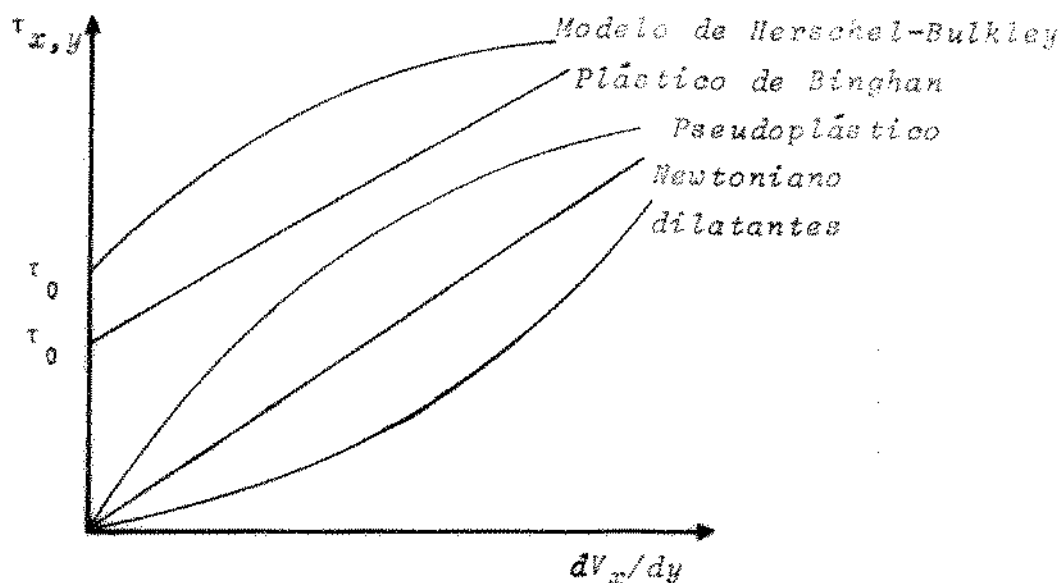


FIGURA 2 - CURVAS DE ESCOAMENTO PARA FLUIDOS PURAMENTE VISCOSOS INDEPENDENTES DO TEMPO.

Para muitos desses fluidos uma representação gráfica de $\log \tau_{yx}$ versus $\log dV_x/dy$ de um modo geral é da forma linear para uma grande faixa de taxas de deformação e portanto podem ser representadas pelo modelo de Ostwald-de Waele (Equação (5)). O índice de comportamento de escoamento 'n' é a inclinação da reta obtida. Se $0 < n < 1$ o fluido é dito pseudoplástico, sendo que quanto menor for n maior será a sua pseudoplasticidade. O índice de consistência 'K' pode ser obtido pela intersecção da reta com o eixo de $\log \tau_{yx}$ na posição $\log dV_x/dy = 1$, ou então, através de uma regressão matemática pelo método dos mínimos quadrados que fornece os valores de K e n.

Por analogia com fluidos Newtonianos, em que $n = 1$, pode-se escrever a equação (3) da seguinte forma:

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dV_x}{dy} \quad (3)$$

onde η é a viscosidade aparente.

Neste caso:

$$\eta = K' \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^{n-1} \quad (4)$$

EQUAÇÃO	MODELO	FORMA	CONSTANTES EMPÍRICAS
(5)	Ostwald-de Waele	$\tau_{yx} = K' \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n$	K', n
(6)	Ellis	$\tau_{yx} = \frac{1}{A+B \tau_{yx}^{\alpha-1}} \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$	A, B, α
(7)	De Haven	$\tau_{yx} = \frac{\mu_0}{1+C \tau_{yx}^\alpha} \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$	μ_0, C, α
(8)	Prandtl- Eyring	$\tau_{yx} = A \operatorname{sen} h^{-1} \left \frac{1}{B} \left(\frac{dv_x}{dy} \right) \right $	A, B
(9)	Powell- Eyring	$\tau_{yx} = C \frac{dv_x}{dy} + \frac{1}{B} \operatorname{sen} h^{-1} \left \frac{1}{A} \left(\frac{dv_x}{dy} \right) \right $	A, B, C
(10)	Reiner- Phillippoff	$\tau_{yx} = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1+(\tau_{yx}/A)^2} \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$	μ_0, μ_∞, A
(11)	Sisko	$\tau_{yx} = A \left(\frac{dv_x}{dy} \right) + B \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^\alpha$	A, B, α

TABELA 1. MODELOS EMPÍRICOS QUE RELACIONAM τ_{yx} COM $\frac{dv_x}{dy}$ PARA FLUIDOS QUE NÃO NECESSITAM DE TENSÃO INICIAL PARA ESCOAR.

Como n é menor do que a unidade para fluidos pseudoplásticos, a Equação (4) mostra que a viscosidade aparente diminui com o acréscimo da taxa de deformação.

Exemplos de fluidos pseudoplásticos: soluções de polímeros, algumas graxas, tintas, purê de frutas e sucos de frutas concentrados.

Outro tipo de comportamento é apresentado pelos materiais dilatantes. São observados dois fenômenos nos materiais dilatantes: dilatação volumétrica, ou seja, aumento do volume total sob cisalhamento e dilatação reológica, que é um aumento na viscosidade aparente devido ao acréscimo na taxa de deformação. Uma boa discussão a respeito do fenômeno de dilatância é apresentada por Brodkey (4).

A curva de comportamento desse fluido é mostrada na Figura (2) e pode ser representada pelos modelos da Tabela (1), sendo o modelo de Ostwald-de Waele mais frequentemente utilizado, lembrando apenas que para estes materiais n é maior que a unidade. Exemplos de fluidos dilatantes são suspensões de amido, suspensão de silicato de potássio e soluções de goma-arábica.

O comportamento físico, dos fluidos que necessitam de uma tensão inicial para escoar, é explicado em termos de uma estrutura interna tridimensional, a qual é capaz de impedir o movimento quando a tensão de cisalhamento é menor que a tensão inicial de escoamento, denominada τ_0 . Para τ_{yx} maior que τ_0 , a estrutura interna se rearranja completamente, permitindo o escoamento. Esta estrutura se refaz instantaneamente quando τ_{yx} volta a ser menor que τ_0 . A Figura 2 mostra as curvas de escoamento para esses fluidos. Alguns modelos empíricos que relacionam a tensão de

cisalhamento com a taxa de deformação para estes fluidos são mostrados na Tabela 2.

EQUAÇÃO	MODELO	FORMA	CONSTANTES EMPÍRICAS
(12)	Bingham	$\tau_{yx} - \tau_0 = \eta \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$	τ_0, η
(13)	Herschel- Bulkley	$\tau_{yx} - \tau_0 = \eta \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^m$	τ_0, η, m

TABELA 2 - MODELOS EMPÍRICOS PARA FLUIDOS QUE NECESSITAM DE TENSÃO INICIAL PARA ESCOAR.

Os fluidos puramente viscosos dependente do tempo são classificados em dois grupos: tixotrópicos e reopéticos, dependendo de como uma tensão de cisalhamento aplicada varia com o tempo para uma dada taxa de deformação a uma dada temperatura. Os materiais tixotrópicos apresentam um decréscimo reversível na tensão de cisalhamento com o tempo para uma dada taxa de deformação constante a uma temperatura. Se a curva de escoamento é medida numa única experiência na qual a taxa de deformação é suavemente aumentada de zero até um valor máximo e então baixada suavemente até zero, observa-se um ciclo de histerese, como mostrado na Figura (3), onde as setas indicam a sequência experimental. É importante notar que, para o mesmo fluido, a forma do ciclo será diferente para uma história de tempo diferente, isto é, de uma para outra experiência.

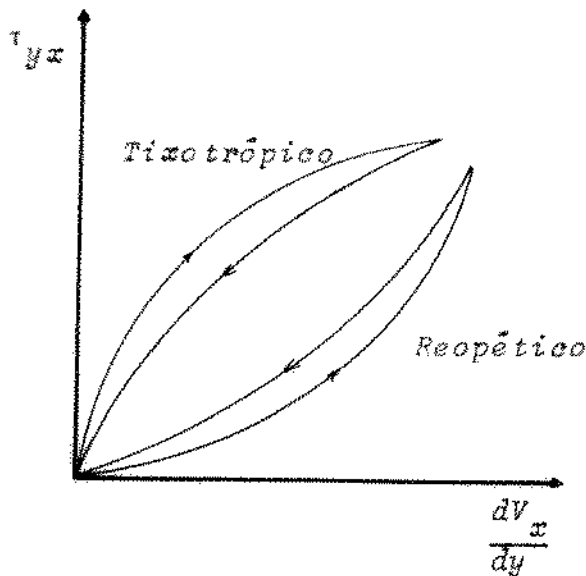


FIGURA 3 - COMPORTAMENTO CARACTERÍSTICO PARA FLUIDOS DEPENDENTES DO TEMPO

São menos comuns os materiais que apresentam comportamento reopético. Eles se caracterizam por um aumento reversível na tensão de cisalhamento com o tempo para uma taxa de deformação constante a uma dada temperatura. Num ensaio análogo àquele dos materiais tixotrópicos obtém-se um ciclo de histerese mostrado na Figura (3) e a forma do ciclo é novamente dependente da história do fluido.

O terceiro grupo apresentado é dos fluidos viscoelásticos. Estes materiais possuem tanto propriedades viscosas quanto elásticas, daí serem designados viscoelásticos. Num sólido puramente elástico a tensão correspondente a uma dada alongação é independente do tempo, enquanto que nas substâncias viscoelásticas a tensão é gradualmente aliviada. Por outro lado, em contraste com os fluidos puramente viscosos, os materiais viscoelásticos escoam quando sujeitos a uma tensão, mas parte de sua deformação é recuperada quando se remove a tensão, Sakiadis (19) e Stratton (26).

Os trabalhos desenvolvidos nesta área são poucos e estão

divididos em dois grupos. Um grupo busca correlacionar a estrutura molecular com o comportamento reológico e portanto com as propriedades de transporte do material e outro grupo tenta estabelecer uma equação geral de estado que possa juntamente com as equações do movimento e da continuidade, prever o comportamento do fluido em situações de interesse prático.

Uma extensa análise do comportamento reológico sobre fluidos de grande interesse na área de alimentos é apresentada por Sherman (22).

2.2. Principais tipos de Viscosímetros

Existe uma grande variedade de aparelhos destinados à medição das propriedades reológicas dos materiais e que estão sendo denominados atualmente de 'Reômetros', Sherman (23) e Van Wazer (27). Estes são escolhidos em função de diversos fatores, tais como:

- a) material a ser ensaiado: quanto ao material pode-se ter fluidos (Newtonianos, não-Newtonianos, Viscoelásticos), sólidos e semi-sólidos.
- b) propriedade a ser medida: quanto a esta pode-se ter propriedades viscosas, elásticas e viscoelásticas.
- c) finalidade da medição: que pode ser uma pesquisa específica, um controle de qualidade, uma caracterização reológica.

A apresentação será restrita aqui apenas às propriedades viscosas de fluidos.

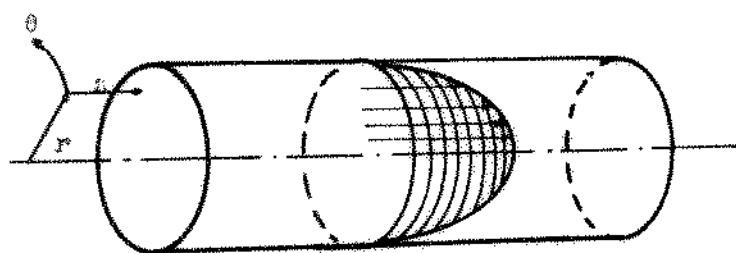
Para os fluidos mais comuns são recomendado basicamente os seguintes tipos de viscosímetros:

- a) para fluidos Newtonianos são indicados os viscosímetros de tu-

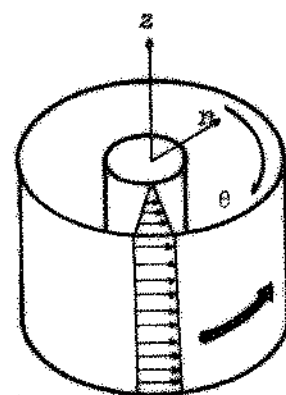
bo capilar, de cilindros coaxiais, de cone e prato, de esfera descendente e orifício.

b) para fluidos não-Newtonianos e não elásticos tem-se indicado o viscosímetro de cilindros coaxiais, de cone e prato, e de tubo capilar.

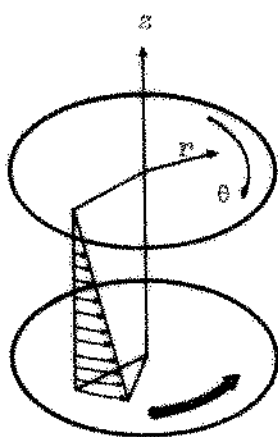
c) para fluidos viscoelásticos usa-se o viscosímetro de cilindros coaxiais modificado, de cone e prato simples ou com movimento oscilatório.



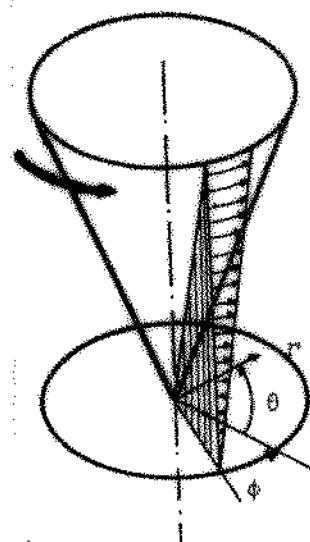
a) escoamento Poiseuille



b) escoamento Couette



c) torção entre pratos paralelos



d) torção entre cone e prato

FIGURA 4 - DEFORMAÇÃO DE UM FLUIDO NOS PRINCIPAIS TIPOS DE VISCO SÍMETROS.

São apresentados na Figura (4) os esquemas de deformação a que está submetido um fluido quando ensaiado nos principais tipos de viscosímetros, Middleman (14).

Sabendo-se que é de fundamental importância conhecer as equações de cálculo dos parâmetros reológicos apresenta-se a seguir algumas delas para quatro tipos principais de viscosímetros segundo Sherman (23), Wohl (30).

Viscosímetro de tubo capilar:

- Viscosidade para fluidos Newtonianos

$$\mu = \pi \Delta P R^4 / 8 L Q \quad (14)$$

- Viscosidade aparente para fluido não-Newtoniano

$$\eta = \pi \Delta P R^4 / 8 L Q \left(\frac{dQ}{dP} + \frac{P}{4} \frac{d^2 Q}{dP^2} \right) \quad (15)$$

- Taxa de deformação

$$\dot{\gamma}_w = (4 Q / \pi R^3) \left(\frac{3}{4} \frac{n+1}{n} \right) \quad (16)$$

- Tensão de cisalhamento

$$\tau_w = \Delta P R / 2 L \quad (17)$$

Viscosímetro de cilindros coaxiais:

- Viscosidade para fluidos Newtonianos

$$\mu = T \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) / 4 \pi h_c \Omega_a \quad (18)$$

- Viscosidade aparente para fluidos não-Newtonianos

$$\eta = T \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) / 4 \pi h c \Omega_a - \frac{\dot{\gamma}}{\Omega_a} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (19)$$

- Taxa de deformação máxima

$$\dot{\gamma}_{\max} = 2 \Omega_a / R_1^2 \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (20)$$

- Taxa de deformação mínima

$$\dot{\gamma}_{\min} = 2 \Omega_a / R_2^2 \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (21)$$

- Tensão de cisalhamento

$$\tau = T \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) / 4 \pi h c \quad (22)$$

Viscosímetro de Cone e Prato:

- Viscosidade para fluidos Newtonianos

$$\mu = (3 T / 2 \pi R_p^3) / (\Omega_a / \psi_a) \quad (23)$$

Obs. para pequenos valores de ψ_a (ângulo do cone)

- Taxa de deformação

$$\dot{\gamma} = \Omega_a / \psi_a \quad (24)$$

- Tensão de cisalhamento

$$\tau = 3 T / 2 \pi R_p^3 \quad (25)$$

Viscosímetro de esfera descendente:

- Viscosidade para fluidos Newtonianos

$$\mu = \frac{2}{9} (\rho_s - \rho_f) v_s g R_s^2 \quad (26)$$

Obs. Não existe teoria desenvolvida para viscosidade de fluidos não-Newtonianos.

- Taxa de deformação

$$\dot{\gamma} = 3 v_s / 2 R_s \quad (\text{valor máximo}) \quad (27)$$

Obs. A taxa de deformação é função da posição (ângulo) considerada na esfera.

2.3. Aplicações e limitações de alguns viscosímetros comerciais

2.3.1. Haake Rotovisko

Princípio de operação: copo externo fixo e cilindro interno giratório. São disponíveis diversas combinações de copos e cilindros. Mede-se o torque necessário para manter o cilindro interno a uma dada rotação constante que varia de 3,6 a 582 rpm em dez divisões. Usando sistema de redução pode-se baixar a rotação a um décimo ou a um centésimo do valor original. Alguns cilindros são ranhurados para evitar deslizamento na parede.

Aplicações e limitações: disponível para taxa de deformação abaixo de 10^{-2} seg^{-1} . Pode ser usado para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos, sendo também possível estudar a recuperação da estrutura do fluido a baixas taxas de deformação, depois de aplicação das altas taxas. Devido a centrifugação, em altas rotações, tem-se problema de sedimentação de partículas que podem estar presentes no fluido de ensaio. O controle de temperatura não é satisfatório quando operado em altas taxas de deformação.

2.3.2. *Epprecht Rheomat*

Princípio de operação: copo externo fixo e cilindro rotatório interno com as partes superior e inferior cônica, sendo disponíveis diversas combinações de copos e cilindros. A dissipação viscosa entre o cilindro e o fluido é medida via rotação do motor suspenso por uma mola de torsão medindo-se a deflexão angular da mola para fornecer o torque. São disponíveis 15 ou 30 velocidades. A parte cônica do cilindro reduz a turbulência e os efeitos de borda.

Aplicações e limitações: devido à rotação (força centrífuga) apresenta efeitos de borda. Grande espaço entre o copo e o cilindro permite grande variação no gradiente de velocidade (taxa de deformação). O sistema de suspensão tem um grande momento de inércia o que dificulta a medida de dependência do tempo.

2.3.3. *Brookfield Synchro-Lectric*

Princípios de operação: mede-se a resistência ao movimento de uma haste giratória dentro da amostra. A haste (são disponíveis 7 modelos) é conectada ao motor por uma mola de torção. A deflexão angular da mola é lida numa escala de torque. As geometrias (dimensões) das hastes e rotações disponíveis resultam numa grande faixa de taxa de deformação.

Aplicações e limitações: as geometrias das hastes torna difícil o cálculo da taxa de deformação. Não se recomenda este tipo de viscosímetro para medidas de viscosidade absoluta. São afetados por efeito de borda e o fluxo das linhas de corrente é distorcido.

2.3.4. *Ferranti Shirley*

Princípio de operação: cone de pequeno ângulo gira sobre um prato plano e fixo. São disponíveis 3 cones, sendo que o ápice do cone toca o prato e a amostra é deformada (cisalhada) no espaço entre ambos. O torque necessário para manter o cone em movimento é medido por um torquímetro eletro-mecânico. Apenas 0,5 ml de amostra é necessário para o ensaio.

Aplicações e limitações: uma taxa de deformação uniforme é conseguida devido ao pequeno ângulo do cone. Próprio para medidas de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. Adequado para altas e baixas taxas de deformação. Praticamente não apresenta efeitos de borda e a amostra permanece no espaço entre o cone e o prato por tensão superficial.

2.3.5. *Ostwald (tubo em U)*

Princípio de operação: bulbo reservatório do qual um volume fixo de amostra flui através do capilar a um outro bulbo que está localizado na parte inferior do outro ramo do tubo em U.

Aplicações e limitações: pequena força de deslocamento por ser operado pela gravidade, o que resulta numa baixa taxa de deformação. Apropriado apenas para medidas de fluidos Newtonianos. Ampla faixa de medidas de viscosidade devido às diversas dimensões dos capilares.

2.3.6. *Canon Fenske*

Princípio de operação: bulbo reservatório e bulbo coletor estão localizados no mesmo tubo vertical. Um volume fixo de amostra flui do bulbo superior ao inferior através do capilar. E

xistem várias combinações de comprimento e diâmetros o que torna bastante ampla a faixa de aplicação.

Aplicações e limitações: devido a sua configuração são minimizados os erros introduzidos quando o viscosímetro não está perfeitamente na posição vertical. Assim é indicado apenas para medições de fluidos Newtonianos, porém quando se produz uma pressão externa auxiliar também pode ser usado para ensaiar fluidos não Newtonianos.

2.3.7. Instron Rheometer

Princípio de operação: amostra contida numa câmara cilíndrica é forçada a escoar pelo capilar através de um pistão que se move com várias velocidades. São disponíveis uma série de capilares com diferentes diâmetros e comprimentos. A força requerida para mover o pistão a uma dada velocidade e para um determinado capilar é detectada por uma célula de carga.

Aplicações e limitações: sendo a taxa de deformação uma função dos diâmetros do cilindro e do capilar e da velocidade do pistão, pode-se notar que a combinação entre esses valores resulta numa ampla faixa dessa taxa de deformação. Este tipo de viscosímetro tem equações bem definidas para cálculo da tensão de cisalhamento e da taxa de deformação o que o torna apropriado para ensaiar fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Não há limitações do ponto de vista teórico para este tipo de reômetro. As limitações são apenas de ordem prática.

2.3.8. Redwood, Saybolt e Engler

Princípio de operação: consiste basicamente de um reserva

tório com um orifício no fundo e um receptáculo para o fluido que escoar. Mede-se o tempo para um volume fixo de amostra escoar através do orifício.

Aplicações e limitações: o tempo de efluxo é tomado como medida arbitrária da viscosidade, embora o mesmo não seja relacionado de uma maneira simples, isto é, existem equações empíricas que correlacionam o valor do tempo de efluxo com a viscosidade absoluta, no entanto não se deve usar esses viscosímetros para medidas absolutas de viscosidade. São empregados apenas para medidas em óleos lubrificantes e óleos combustíveis.

2.3.9. *Hoppler*

Princípio de operação: um tubo cilíndrico de vidro contém a amostra. É medido o tempo de queda de uma esfera de aço. Deve ser assegurado que a velocidade da esfera seja constante na região de medida. São disponíveis 6 esferas de diferentes diâmetros.

Aplicações e limitações: difícil de se definir tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Apropriados apenas para medidas de fluidos Newtonianos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Dimensionamento do viscosímetro capilar de pressão variável.

A análise aqui desenvolvida limita-se à aplicação do modelo de Ostwald-de Waele, o qual representa bem o comportamento reológico dos fluidos quando se trabalha com valores não muito extremos da taxa de deformação, que é o caso deste trabalho bem como dos casos mais comuns encontrados na prática.

O escoamento de fluidos não-Newtoniano em tubo cilíndrico é bastante complexo e pode ser dividido em três regiões. Na 'região de entrada' ocorre o desenvolvimento de grandes tensões devido ao efeito de afunilamento no fluxo do fluido que vem do reservatório, isto é, desenvolvimento do perfil de velocidades, onde ocorre aceleração do fluido na parte central do capilar, Coury (7), Skelland (24). Estas tensões vão se aliviando à medida que a situação evolue para o perfil de velocidade plenamente desenvolvido. Existem correlações que tentam prever o comprimento de entrada, Skelland (24).. Para os fluidos do tipo pseudo plástico ou dilatante, tais equações são da forma:

$$l_e = C \cdot d \cdot N_{Re} \quad (28)$$

onde o valor de C depende de n. Para $n = 1$, C tem um valor de 0,0575 e quando n é diferente da unidade o valor de C pode ser tirado de um gráfico apresentado por Skelland (24), que relaciona as variáveis acima.

A 'região viscosimétrica' é caracterizada pelo gradiente constante de pressão ao longo do capilar. É nessa região que ocorre um escoamento simples em estado estacionário.

A 'região de saída' é caracterizada pela mudança brusca das

condições de contorno no fim do capilar. Quando o fluido emerge do tubo capilar ocorre uma mudança na sua forma. Para um fluido viscoelástico ocorre um inchamento do material, de tal forma que o diâmetro da corrente livre é maior que o diâmetro do capilar. Este efeito é conhecido como 'die swell'. A medida da relação de diâmetros (extrudado/capilar) no 'die swell' é uma das maneiras de se correlacionar as propriedades elásticas do material, Bird et al.(2); Brodkey (4), Coury (7), Skelland (24).

A seguir, é apresentada uma análise do problema de escoamento no interior de um tubo que levam à utilização dessa configuração como um reômetro. Dimensões e sistema de referência estão indicados na Figura (5).

Hipóteses iniciais:

- 1) na parede do capilar $v_z = 0$
- 2) $v_r = v_\theta = 0$ e $v_z = v$
- 3) a queda de pressão no reservatório de diâmetro D, os efeitos de entrada e saída, a variação de energia cinética entre a entrada e a saída do capilar e a força de atrito entre o pistão e o cilindro serão considerados como um comprimento adicional L_0 ou então consequentemente como uma força adicional F_0 .
- 4) a variação de pressão na direção z não depende de r.

$$\frac{\delta P}{\delta z} \neq f(r)$$

- 5) o escoamento no capilar é isotérmico, laminar e em regime permanente.

Aplicando-se a equação de Navier Stokes em coordenadas cilíndricas para a componente Z, como apresentada por Bird et al. (2), Shames (22) e Vennard (28).

DIMENSÕES DO VISCOSÍMETRO

- $L' = 35,0 \text{ cm}$
- $D = 5,0 \text{ cm}$
- $L = 25,0; 50,0 \text{ e } 75,0 \text{ cm}$
- $d = 1,652; 2,663; 4,080; 5,960 \text{ e } 7,920 \text{ mm}$

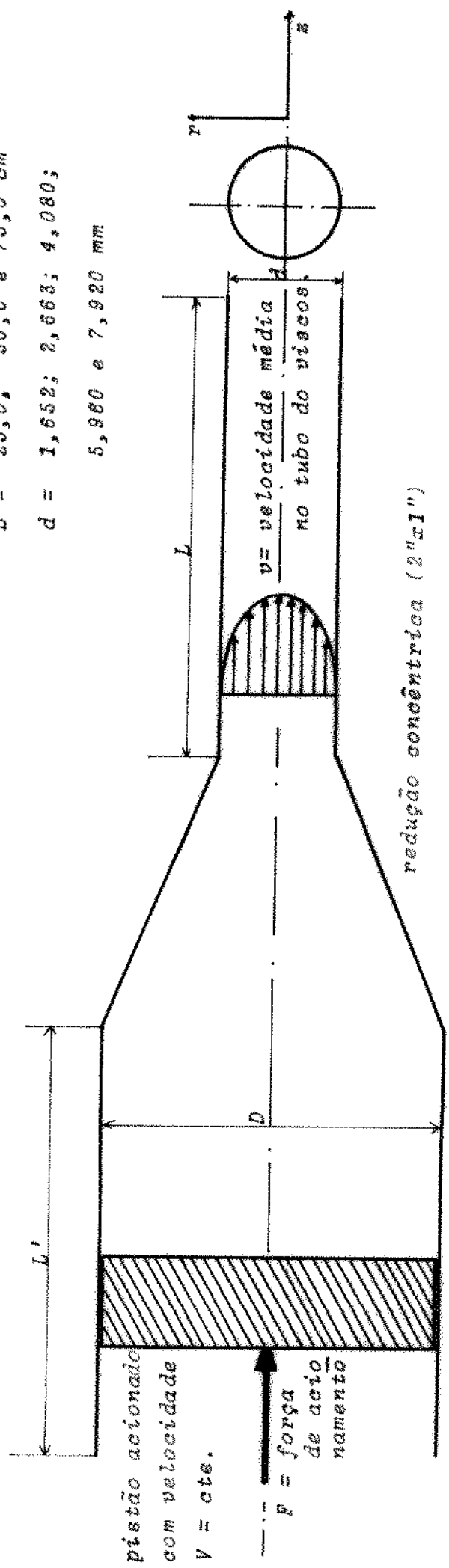


FIGURA 5. ESQUEMA DO VISCOSÍMETRO UTILIZADO NESTE TRABALHO.

$$0 = - \frac{\delta P}{\delta z} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \tau_{rz}) \quad (29)$$

como $\frac{\delta P}{\delta z} \neq f(r)$ a integração de (29) resulta

$$r \tau_{rz} = - \frac{r^2}{2} \frac{\delta P}{\delta z} + C$$

Condição de contorno: em $r = 0 \rightarrow \tau_{rz} = 0$, logo $C = 0$ e tem-se que:

$$\tau_{rz} = - \frac{r}{2} \frac{\delta P}{\delta z}$$

Considerando L_0 comprimento da região viscosimétrica, en
tão:

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \frac{\Delta P}{L} \quad (30)$$

Levando-se em conta a hipótese inicial 3, pode-se considerar que

$$\Delta P = \frac{4}{\pi D^2} (F - F_0)$$

e substituindo em (30) vem

$$\tau_w = \frac{d}{\pi D^2 L} (F - F_0) \quad (31)$$

Tem-se τ_w , a tensão de cisalhamento na parede, em função das grandezas mensuráveis que são a força (F) e a geometria do sistema (D, d e L).

Considerando-se agora a taxa de deformação.

Seja $\dot{\gamma} = \frac{dz}{dr}$ um elemento infinitesimal de deformação do fluido que escoar na direção z.

Então:

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dr} \right) = \frac{d}{dr} \left(\frac{dz}{dt} \right) = \frac{dv}{dr}$$

Portanto:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} \quad (32)$$

que é a taxa de deformação.

Considerando que o modelo de Ostwald-de Waele (Tabela 1, Equação 5) representa o comportamento do fluido, então em coordenadas cilíndricas:

$$\tau_{rz} = K' \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad \text{ou} \quad \tau_{rz} = K' (\dot{\gamma}_w)^n \quad (33)$$

A equação (31) dá a tensão de cisalhamento em função de valores mensuráveis e se for possível obter uma expressão em função desses valores para a taxa de deformação será possível conhecer o comportamento reológico do fluido e portanto ajustar um modelo empírico. Em particular, o modelo de Ostwald-de Waele será escolhido determinando-se as constantes K e n.

Para tanto, considerar-se-á primeiramente o fluido como sendo Newtoniano, então:

$$v = v_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

que é o perfil de velocidade de um fluido Newtoniano num tubo circular em escoamento laminar isotérmico plenamente desenvolvido. A taxa de deformação é dada por:

$$\dot{\gamma}_{ap} = \frac{dv}{dr} = - \frac{2r}{R^2} v_{\max} = - \frac{4r}{R^2} v_b,$$

onde v_b é a velocidade média na seção transversal do tubo ($v_b = \frac{1}{2} v_{\max}$) e neste caso se usa $\dot{\gamma}_{ap}$ (taxa de deformação aparente), pois considera-se o fluido como sendo Newtoniano, em primeira a-

proximação. Em $r = R$, tem-se:

$$\dot{\gamma}_{ap,w} = - \frac{8 v_b}{d} \quad (34)$$

O balanço de massa diz que:

$$vd^2 = V D^2; \text{ e então tem-se:}$$

$$\dot{\gamma}_{ap,w} = - \frac{8 V D^2}{d^3} \quad (35)$$

A equação (35) dá a taxa de deformação aparente em função de quantidades mensuráveis: velocidade do êmbolo (V) e fatores geométricos do conjunto (d , D). Acontece de que a consideração do fluido ser Newtoniano não é verdadeira. Portanto, torna-se necessário corrigir $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para fluidos não-Newtonianos. Esta correção é baseada no perfil de velocidades que é função de n e foi feita por Rabinowitch-Mooney, Coury (7) e tem a seguinte dedução: Tome-se as Equações (30), (32) e (33)

$$\tau_{rz} = - \frac{\Delta P d}{4 L} = - \frac{\Delta P r}{2 L} \quad (30)$$

$$\tau_{rz} = K' (\dot{\gamma}_w)^n \quad (33)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} \quad (32)$$

Portanto:

$$- \frac{\Delta P r}{2 L} = K' \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad \text{ou}$$

$$\frac{dv}{dr} = \left(- \frac{\Delta P r}{2 K' L} \right)^{1/n}$$

Integrando, temos:

$$\int_0^v dv = \int_R^r \left(-\frac{\Delta P}{2K'L}\right)^{1/n} r^{1/n} dr$$

$$v = \left(-\frac{\Delta P}{2K'L}\right)^{1/n} \frac{n}{n+1} (r)^{n+1/n} \Big|_R^r$$

Substituindo e simplificando, temos:

$$v = - \left(-\frac{\Delta P}{2K'L}\right)^{1/n} \frac{n}{n+1} (R)^{n+1/n} \left| 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1/n} \right| \quad (36)$$

mas em $r = 0$, $v = v_{\max}$. Então:

$$v_{\max} = - \left(-\frac{\Delta P}{2K'L}\right)^{1/n} \frac{n}{n+1} (R)^{n+1/n} \quad (37)$$

E, dividindo (36) por (37) temos que:

$$v = v_{\max} \left| 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1/n} \right| \quad (38)$$

Cálculo de velocidade média, v_b :

$$v_b = \frac{1}{A} \iint_A v \cdot dA$$

$$v_b = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R v_{\max} \left| 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1/n} \right| r \cdot dr \cdot d\theta \quad (39)$$

Integrando (39) e simplificando, temos:

$$v_b = v_{\max} \left(\frac{n+1}{3n+1}\right) \quad (40)$$

Substituindo (37) em (40), vem:

$$v_b = - \left(-\frac{\Delta P}{2K'L}\right)^{1/n} \frac{n}{3n+1} (R)^{n+1/n} \quad (41)$$

Cálculo de $\dot{V}_w$ (real):

$$\dot{\gamma}_w = \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=R}$$

Substituindo em (38), fica:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{d}{dr} \left\{ v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{n+1/n} \right] \right\} \Big|_{r=R}$$

$$\dot{\gamma}_w = - \frac{v_{\max}}{R} \left(\frac{n+1}{n} \right)$$

Substituindo em (37), vem:

$$\dot{\gamma}_w = - \left(- \frac{\Delta P R}{2K' L} \right)^{1/n} \quad (42)$$

Acontece que o que se mede é v_b . Portanto, ao se comparar as Equações (41) e (42) resulta:

$$v_b = \dot{\gamma}_w \left(\frac{n}{3n+1} \right) (R) \quad (43)$$

Por outro lado, a Equação (34) fornece este mesmo valor em termos de fluidos Newtonianos:

$$\dot{\gamma}_{ap,w} = \frac{8 v_b}{d} \quad (44)$$

Portanto:

$$v_b = \frac{\dot{\gamma}_{ap,w} d}{8} = \frac{\dot{\gamma}_{ap,w} R}{4} \quad (45)$$

Finalmente, igualando-se (43) e (45) resulta:

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \dot{\gamma}_{ap,w} \quad (46)$$

que é a chamada correção de Rabinowitch-Mooney, onde $\dot{\gamma}_w$ é a taxa de deformação corrigida e n é o índice de comportamento de escoamento do modelo de Ostwald-de Waele. Pode-se então

escrever que:

$$\tau_w = K'(\dot{\gamma}_w)^n = K(\dot{\gamma}_{ap,w})^n \quad (47)$$

onde

$$K' = K \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (48)$$

As equações desenvolvidas até aqui serão agora aplicadas ao equipamento de ensaio disponível de modo a se determinar os parâmetros operacionais do viscosímetro em questão, que é constituído das seguintes partes básicas, conforme indicado na Figura (4):

- cilindro para armazenamento do material a ser ensaiado.
- pistão que se desloca dentro do cilindro para forçar o escoamento através do capilar.
- conjunto de tubos (capilares) de diferentes diâmetros e comprimentos, nos quais o material será forçado a escoar.

O pistão move-se dentro do cilindro fazendo com que a amostra seja forçada a passar pelos tubos capilares que tem dimensões conhecidas. Numa das extremidades desses tubos há uma conexão do tipo macho, e esta é rosqueada numa conexão fêmea do cilindro. O pistão é acionado pelo sistema INSTRON 1130 que mede a força necessária para produzir o escoamento dentro de uma faixa de velocidades de deslocamento do pistão, que são determinadas pelo equipamento.

As equações usadas para cálculo dos parâmetros reológicos são os de número (31) e (35).

Num gráfico de τ_w em função de $\dot{\gamma}_{ap,w}$ em papel log-log pode-se determinar as constantes reológicas (K e n) do fluido ensaiado, ou então, através de uma regressão matemática pelo método dos mínimos quadrados, obtendo-se os parâmetros para o modelo escolhido que representa o comportamento do material ensaiado.

O sistema a ser construído teve que ser dimensionado de acordo com as seguintes limitações: tubos capilares com diâmetros disponíveis no mercado, limite de força do sistema de acionamento e as velocidades disponíveis no sistema.

Quanto aos capilares foram usados os seguintes diâmetros internos (d=mm): 1,652; 2,663; 4,080; 5,960 e 7,920. A determinação do diâmetro interno foi feita pelo método de pesagem dos tubos vazios e cheios de mercúrio. Os comprimentos usados foram de 25,0; 50,0 e 75,0 cm para cada diâmetro.

As velocidades de deslocamento (V) do pistão disponíveis no sistema INSTRON 1130 são as seguintes: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 5,0; 8,0; 10,0; 20,0; 40,0 e 80,0 cm/min.

Cálculos preliminares permitiram escolher um diâmetro do êmbolo (D) que satisfizesse às condições limites de operação. O diâmetro de 50 mm foi escolhido.

De posse desses valores (ρ_f , D, V, L e d), que são respectivamente: densidade do fluido (assumida 1g/cm^3), diâmetro interno do cilindro, velocidade do êmbolo, comprimento (assumido 75,0 cm) e diâmetro interno do capilar, supondo diversos valores para n (de 0,05 a 1,0), com K tendo o valor unitário e usando as expressões abaixo, foram elaboradas 20 tabelas, uma para cada combinação de K e n, de onde se pode observar o regi

me de escoamento e qual a força necessária para produzi-lo em função dos parâmetros envolvidos. Estas tabelas são apresentadas no Apêndice.

$$F \text{ (Kgf)} = 9,81 \cdot 10^5 \cdot K \left(\frac{L}{d} \right) \pi D^2 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{3,33 V}{d^3} \right)^n \quad (49)$$

$$N_{Re} (-) = d^n \cdot v^{2-n} \rho_f / K' \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \cdot 8^{n-1} \quad (50)$$

Convém salientar que a equação (49) é facilmente deduzível a partir das equações (30), (33), (35) e (46).

É importante observar que F e N_{Re} são funções diretas de K , isto deixa as 20 tabelas elaboradas para o dimensionamento bastante amplas, bastando fazer as devidas correções para cada caso em particular, isto é, são múltiplas ou sub-múltiplas para qualquer combinação de K e n , mantendo as demais variáveis fixas.

Analisando os valores das tabelas pode-se ver, por exemplo, que para fluidos não-Newtonianos e considerando a força máxima de 500 Kgf, o que corresponde à célula de carga de 500 Kgf pode-se ensaiar fluidos com valores de K até $2,0 \cdot 10^3$ dina.s/cm², quando $n=0,9$, e K até $4,0 \cdot 10^4$ dina.s/cm² quando $n=0,1$, enquanto que para fluidos Newtonianos o máximo valor de K seria de $2,5 \cdot 10^3$ dina.s/cm².

Os valores de K discutidos acima são exemplos dos máximos possíveis dentro da região laminar de escoamento. Para valores mínimos de K tem-se os seguintes casos: para fluidos Newtonianos (com a célula de 50 Kgf) o mínimo valor de K seria de $1,0 \cdot 10^{-2}$ dina.s/cm² e para um fluido não-Newtoniano com $n=0,1$ o mínimo valor de K seria de 10 dina.s/cm²; já com $n = 0,9$ o mínimo valor de K seria de $2,0 \cdot 10^{-2}$ dina.s/cm².

Como se vê, o viscosímetro está projetado para cobrir uma ampla faixa de tipos de fluidos, cobrindo os casos práticos de maior interesse, inclusive aqueles mais comuns nas indústrias de processo de alimentos.

3.2. Procedimento experimental

O primeiro passo na realização dos ensaios do sistema de capilares é a escolha de alguns fluidos para testes. Foram escolhidos dois fluidos Newtonianos (glicerina e óleo lubrificante para motor a combustão) e um fluido não-Newtoniano (solução de CMC a 3% em água). Com os valores aproximados dos parâmetros reológicos citados na literatura, Bird et al. (2), Perry (17) e consultando as tabelas citadas atrás pode-se escolher qual a faixa de trabalho a ser usada para cada caso.

O procedimento experimental para determinação dos parâmetros reológicos dos fluidos ensaiados é o seguinte:

- 1) Colocação do capilar escolhido.
- 2) Enchimento completo do cilindro com o fluido a ser ensaiado.
- 3) Descer o pistão até encostar no material (ligeira pressão).
- 4) Acionar a máquina INSTRON 1130, deslocando o pistão na velocidade escolhida, provocando o escoamento do fluido através do capilar.
- 5) Após a estabilização do sistema registrar a força aplicada.
- 6) Mudar a velocidade do pistão mediante troca das engrenagens de acionamento.
- 7) Esperar a estabilização do sistema e registrar a força aplicada.

O tempo de operação com cada capilar ficou compreendido na faixa de 10 a 60 minutos e conseguia-se de 2 a 5 registros

de força, dependendo da velocidade do pistão. Com velocidades altas conseguia-se menos pontos do que com velocidades baixas. Portanto, os dados experimentais obtidos eram a velocidade V (cm/min) do pistão e a força correspondente F (Kgf) para manter o escoamento do fluido num dado capilar.

Com o primeiro dado, usando-se a Equação (35) calcula-se $\dot{\gamma}_{ap,w}$, pois:

$$\dot{\gamma}_{ap,w} = 8 V D^2 / d^3 \quad (35)$$

Com o segundo dado, usando a equação (31) calcula-se τ , pois:

$$\tau_w = d (F - F_0) / \pi D^2 L \quad (31)$$

F_0 (Kgf) é obtido, similarmente a Brodkey (4) e Smith et al. (25), construindo-se um gráfico da soma das forças (F) em função de L (comprimento do capilar) para todos os $\dot{\gamma}_{ap,w}$ do ensaio, extrapolando-se o valor de F quando L for igual a zero e tomando-se um valor médio, isto é, dividindo-se o valor encontrado pelo número de pontos do ensaio. Pode-se também obter o valor de F_0 através de uma regressão matemática pelo método dos mínimos quadrados.

Convém salientar que o valor de F_0 representa a queda de pressão no reservatório, o efeito de entrada e de saída do fluido no capilar, a variação da energia cinética do fluido e a força de atrito entre o pistão e o cilindro.

3.3. Análise dos resultados experimentais

Os pares de valores τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ eram combinados e atra

vês de uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados eram determinados os parâmetros K e n do modelo de Ostwald-de Waele para cada capilar isoladamente e para os 3 capilares con juntamente.

Na avaliação dos parâmetros experimentais foram utilizados dois parâmetros estatísticos, citados por Downie e Heath (10).

- a distribuição de probabilidade 'F' Snedecor que representa a homogeneidade de varianças das variáveis então correlacionadas.

- o coeficiente de correlação r^2 que representa uma me dida de correlação entre as duas variáveis (τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$).

O modelo utilizado para correlacionar a tensão de cisa lhamento em função da taxa de deformação foi o de Ostwald-de Waele.

$$\tau_w = K (\dot{\gamma}_{ap,w})^n \quad (47)$$

Tomando-se o logarítmo da Equação (47), tem uma expres são linear

$$\alpha = \beta + n\delta \quad (48)$$

onde:

$$\alpha = \log \tau_w$$

$$\beta = \log K$$

$$\delta = \log \dot{\gamma}_{ap,w}$$

A partir do método de mínimos quadrados, encontra-se os estimadores $\hat{g}$ e $\hat{n}$ para g e n, respectivamente. Supondo-se que os erros são normalmente distribuídos testa-se a hipótese de

$n=0$ contra a hipótese alternativa de $n \neq 0$.

Sob hipótese nula, o quociente $\frac{SQM \text{ Regressão}}{SQM \text{ Resíduos}}$ tem distribuição de probabilidade de 'F' Snedecor com 1 e $(m-2)$ graus de liberdade, onde:

$$SQM \text{ Regressão} = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \bar{\alpha})^2}{1} \quad (49)$$

$$SQM \text{ Resíduos} = \frac{\sum_{i=1}^m (\alpha_i - \hat{\alpha}_i)^2}{m - 2} \quad (50)$$

onde:

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_i &= \hat{\beta} + \hat{n} \delta_i \\ \bar{\alpha} &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \alpha_i \end{aligned} \quad (51)$$

m = número de observações.

É calculado a probabilidade do quociente ser maior ou igual ao 'F' observado. Esta probabilidade é pequena quando se tem 'F' observado muito grande, isto é, maior que 10. Em outras palavras, para 'F' maior que 10 é reforçada a hipótese da existência de uma correlação entre α e δ com um valor n e um valor β definidos.

O outro parâmetro calculado é o coeficiente de correlação r^2 , que é dado pelo quociente:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \bar{\alpha})^2}{\sum_{i=1}^m (\alpha_i - \bar{\alpha})^2} \quad (52)$$

que mede a proporção da variação total de α sobre a média explicada pela regressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

São mostrados a seguir os resultados experimentais obtidos e os calculados desenvolvidos a partir deles.

As Tabelas 3 a 5 e as Figuras 6 a 8 mostram os valores obtidos para τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para 3 capilares diferentes com l/d entre 93,9 a 281,6 e diâmetro de 0,2663 cm calculados para uma amostra de óleo lubrificante para motor a combustão SAE 40 a 22°C.

As Tabelas 6 a 8 e as Figuras 9 a 11 mostram os valores obtidos para τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para 3 capilares diferentes com l/d entre 61,3 a 183,8 e diâmetro de 0,4080 cm calculados para uma amostra de glicerina a 21°C.

As Tabelas 9 a 11 e as Figuras 12 a 14 mostram os valores obtidos para τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para 3 capilares diferentes com l/d entre 61,3 a 183,8 e diâmetro de 0,4080 cm calculados para uma amostra de uma solução de CMC a 3% (peso/volume) em água a 21°C.

a) Ajuste do modelo aos dados experimentais

De acordo com o exposto no item 2.1, o modelo de escoamento de Ostwald-de Waele tem a seguinte característica: uma representação de $\log \tau_w$ em função de $\log \dot{\gamma}_{ap,w}$ tem a forma linear. Como pode ser observado nas Figuras 6 a 14 é evidente a tendência linear da representação de $\log \tau_w$ em função de $\log \dot{\gamma}_{ap,w}$ obtidos a partir dos dados experimentais. As Tabelas 12, 13 e 14 mostram os valores do coeficiente de correlação r^2 das regressões lineares destas representações, os quais são bas

FLUIDO: óleo de motor		$l = 25,0 \text{ cm}$	$d = 0,2663 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 22°C		$F_o = 11,0 \text{ Kgf}$		
V	$\dot{\gamma}_{ap,w}$	F-F _O	τ_w	N _{Re}
(cm/min)	(s ⁻¹)	(Kgf)	(d/cm ²)	(-)
1,0	176,51	4,8	651	0,39
2,0	353,02	10,8	1464	0,79
4,0	706,03	16,8	2278	1,57
5,0	882,54	23,4	3173	1,97
8,0	1412,07	37,7	5112	3,15
10,0	1765,08	48,8	6617	3,94
20,0	3530,17	96,8	13126	7,87

TABELA 3. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA ÓLEO DE MOTOR COM UM CAPILAR DE $l/d = 93,9$.

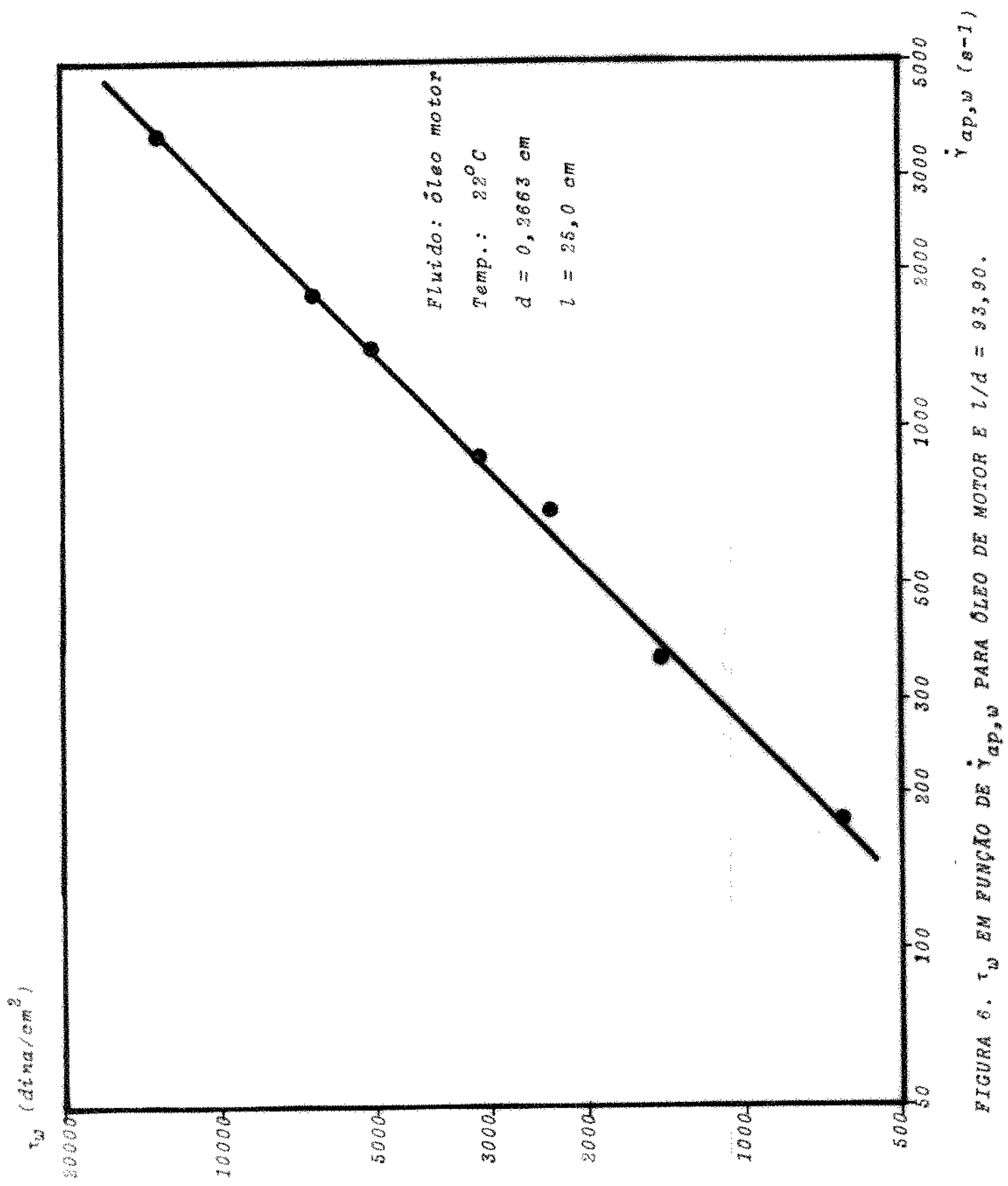


FIGURA 6. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA ÓLEO DE MOTOR E $l/d = 93,90$.

FLUIDO: óleo de motor		$L = 50,0 \text{ cm}$	$d = 0,2663 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 22°C		$F_o = 11,0 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	$F-F_o$ (Kgf)	τ_w (d/cm ²)	N_{Re} (-)
1,0	176,51	9,3	631	0,39
2,0	353,02	17,8	1207	0,79
4,0	706,03	36,2	2554	1,57
5,0	882,54	44,5	3017	1,97
8,0	1412,07	72,8	4937	3,15
10,0	1765,08	91,8	6225	3,94
20,0	3530,17	181,1	12280	7,87

TABELA 4. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA ÓLEO DE MOTOR COM UM CAPILAR DE $l/d = 187,8$.

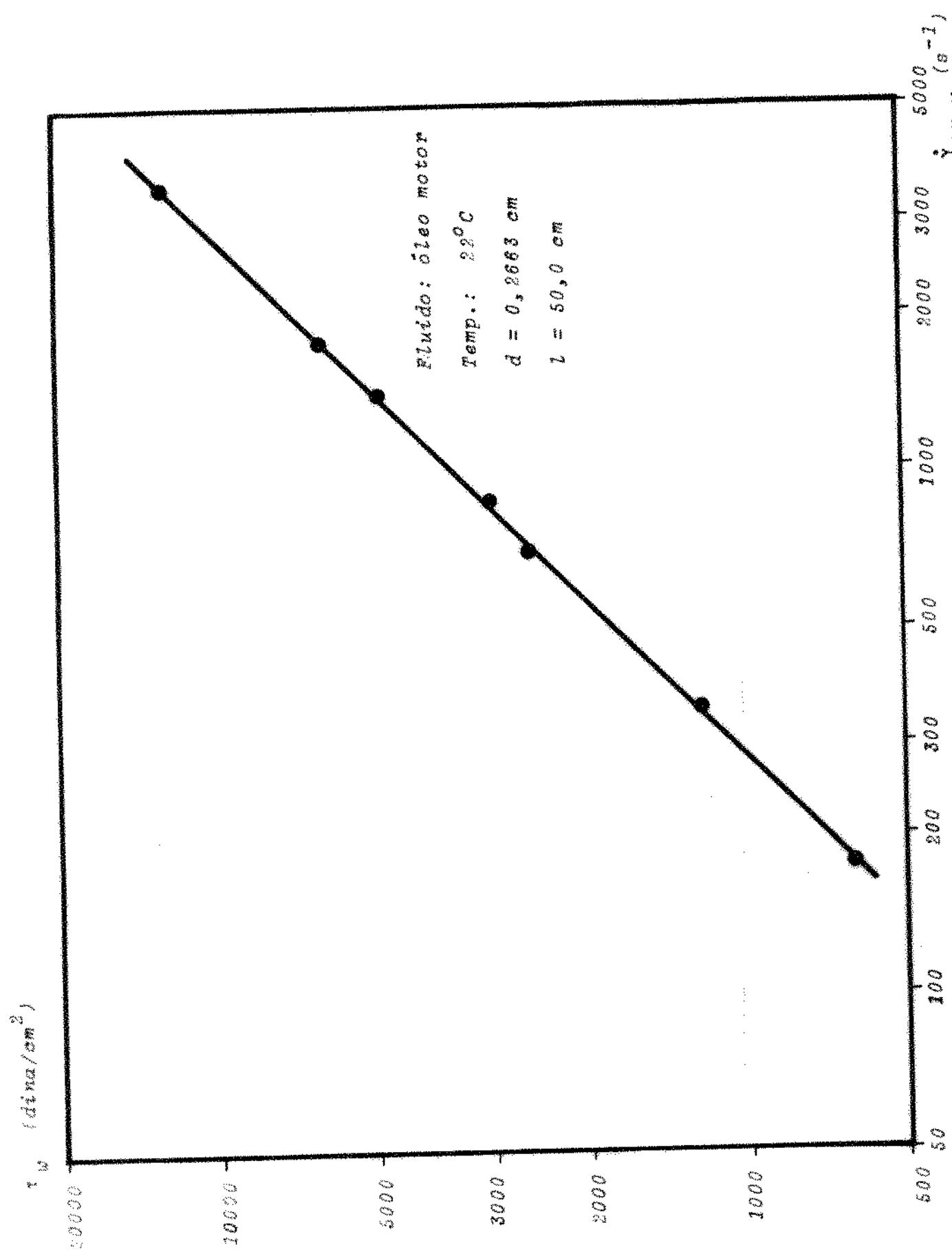


FIGURA 7. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA ÓLEO DE MOTOR E $l/d = 187,8$.

FLUIDO: óleo de motor		$l = 75,0 \text{ cm}$	$d = 0,2663 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 22°C		$F_o = 11,0 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	$F-F_o$ (Kgf)	τ_w (d/cm^2)	N_{Re} (-)
1,0	176,51	14,0	633	0,39
2,0	353,02	27,5	1243	0,79
4,0	706,03	54,5	2464	1,57
5,0	882,54	69,5	3142	1,97
8,0	1412,07	112,2	5073	3,15
10,0	1765,08	137,5	6216	3,94
20,0	3530,17	273,5	12365	7,87

TABELA 5. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA ÓLEO DE MOTOR COM UM CAPILAR DE $l/d = 287,6$.

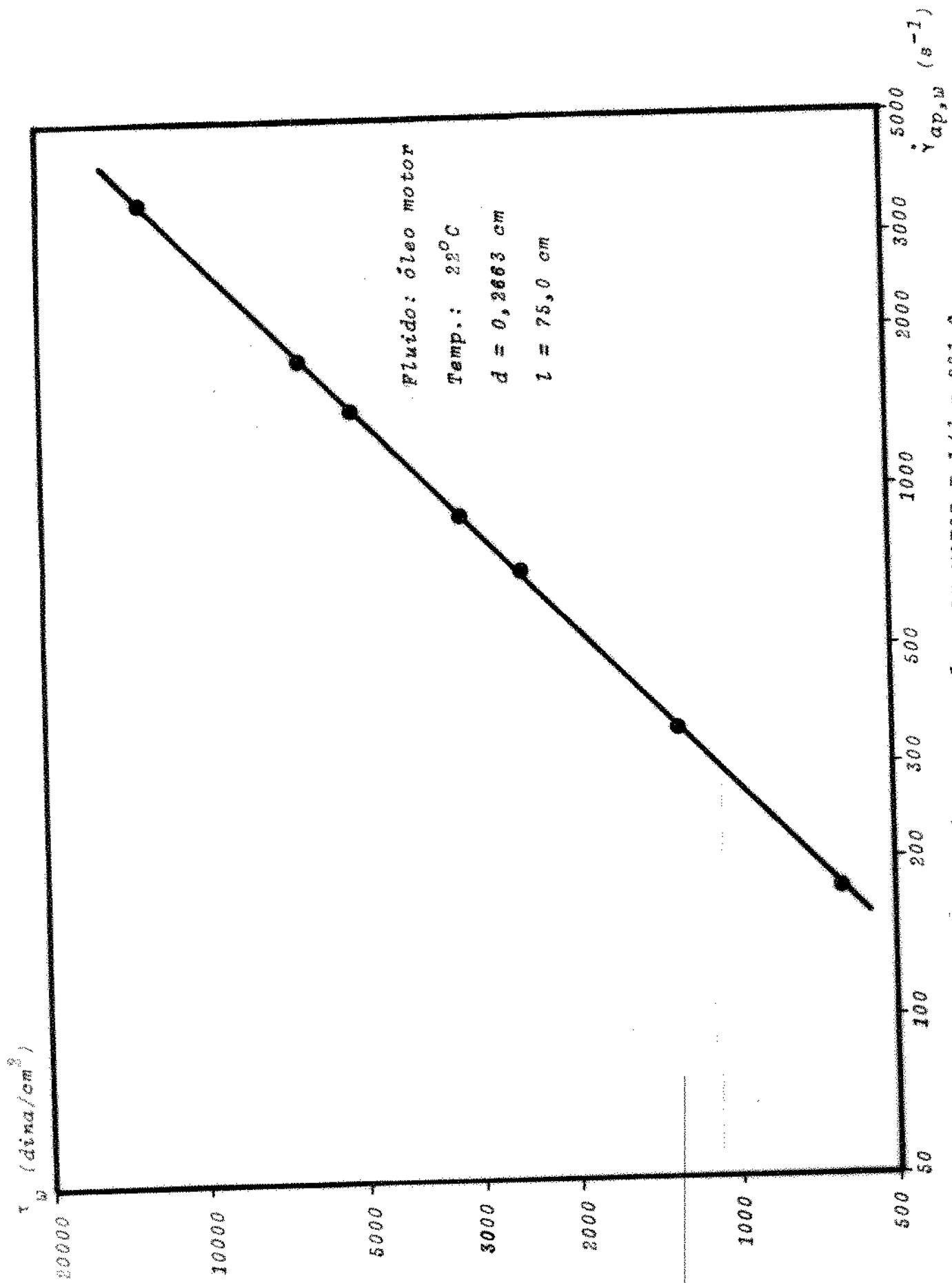


FIGURA 8. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA ÓLEO DE MOTOR E $l/d = 281,6$

FLUIDO: Glicerina		$l = 25,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_o = 4,0 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	F-F _o (Kgf)	τ_w (d/cm^2)	N _{Re} (-)
2,0	98,16	4,0	831	0,26
4,0	196,32	7,5	1558	0,52
5,0	245,40	9,8	2036	0,65
8,0	392,63	16,0	3325	1,04
10,0	490,79	19,5	4052	1,30
20,0	981,59	39,2	8146	2,60
40,0	1963,17	78,5	16312	5,18

TABELA 6. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA GLICERINA COM UM CAPILAR DE $l/d = 61,3$.

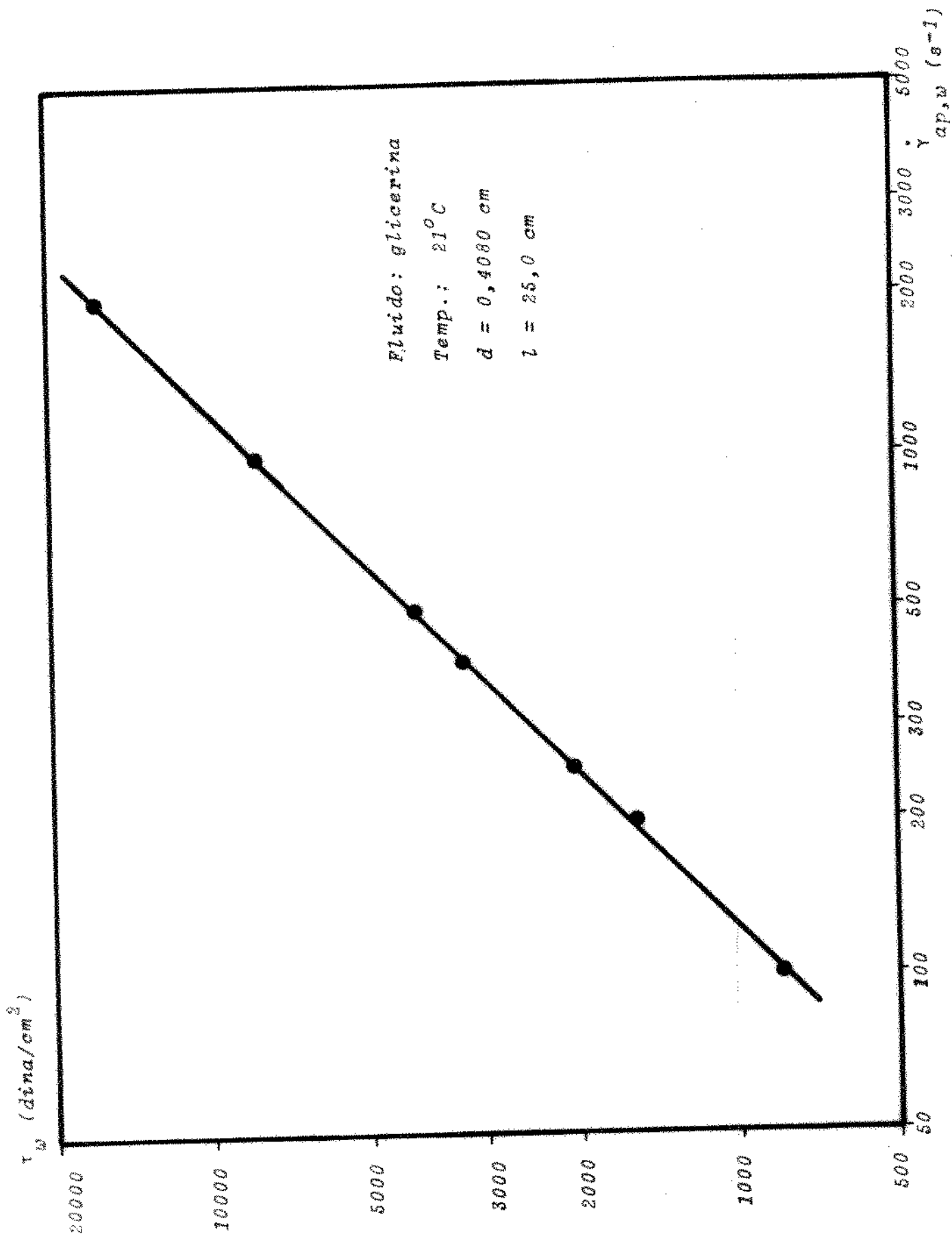


FIGURA 9. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA GLICERINA E $l/d = 61,3$.

FLUIDO: Glicerina		$l = 50,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_o = 4,0 \text{ Kgf}$		
V	$\dot{\gamma}_{ap,w}$	$F-F_o$	τ_w	N_{Re}
(cm/min)	(s^{-1})	(Kgf)	(d/cm^2)	(-)
2,0	98,16	7,5	779	0,26
4,0	196,32	15,0	1558	0,52
5,0	245,40	19,0	1974	0,65
8,0	392,63	30,5	3169	1,04
10,0	490,79	38,4	3990	1,30
20,0	981,59	74,3	7720	2,60
40,0	1963,17	151,4	15730	5,18

TABELA 7. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA GLICERINA COM UM CAPILAR DE $l/d = 122,5$.

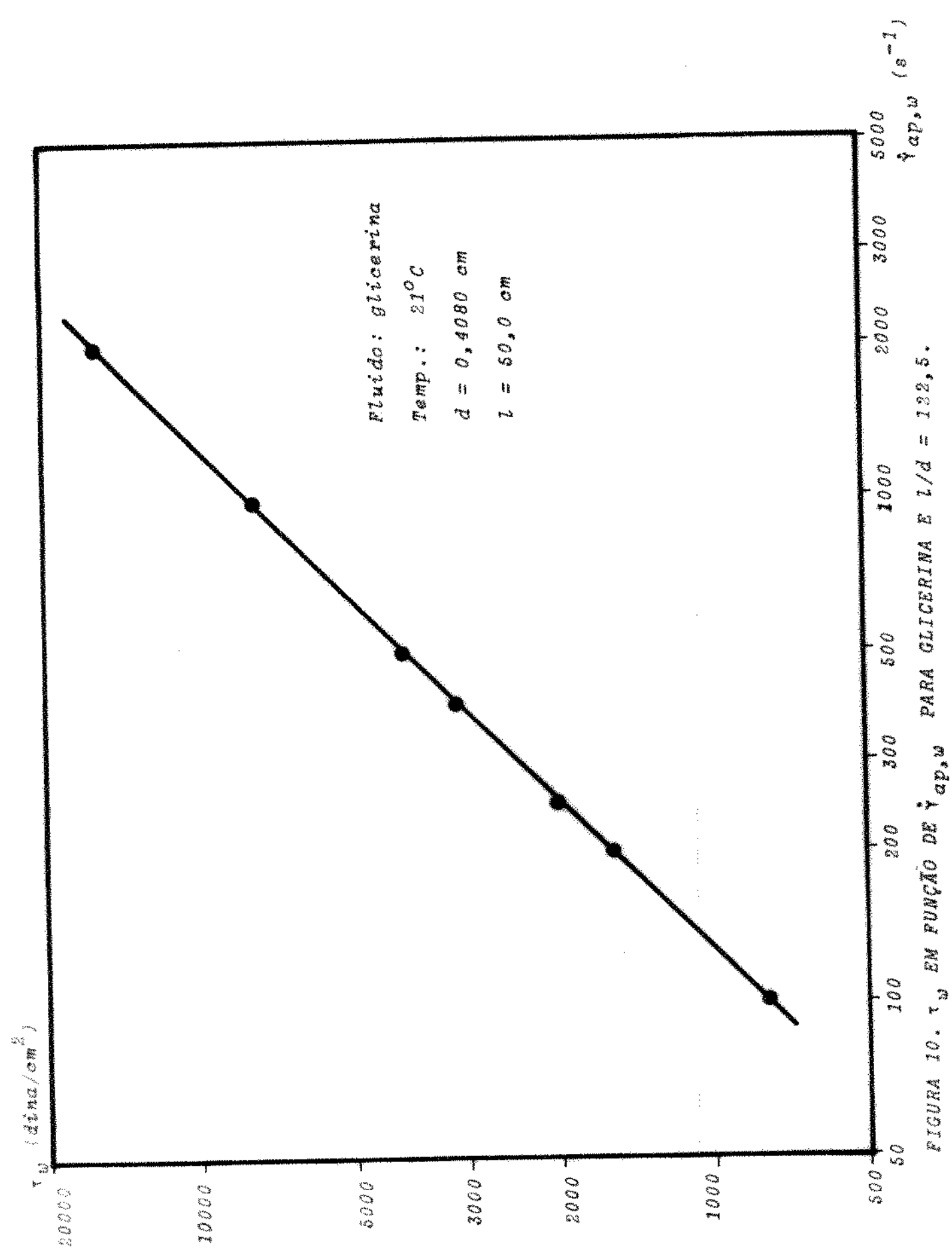


FIGURA 10. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA GLICERINA E $l/d = 132,5$.

FLUIDO: Glicerina		$l = 75,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_0 = 4,0 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	$F-F_0$ (Kgf)	τ_w (d/cm^2)	N_{Re} (-)
2,0	98,16	12,0	831	0,26
4,0	196,32	24,0	1662	0,52
5,0	245,40	29,4	2036	0,65
8,0	392,63	48,5	3359	1,04
10,0	490,79	61,0	4225	1,30
20,0	981,59	124,6	8630	2,60
40,0	1963,17	243,5	16865	5,18

TABELA 8. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA GLICERINA COM UM CAPILAR DE $l/d = 183,8$.

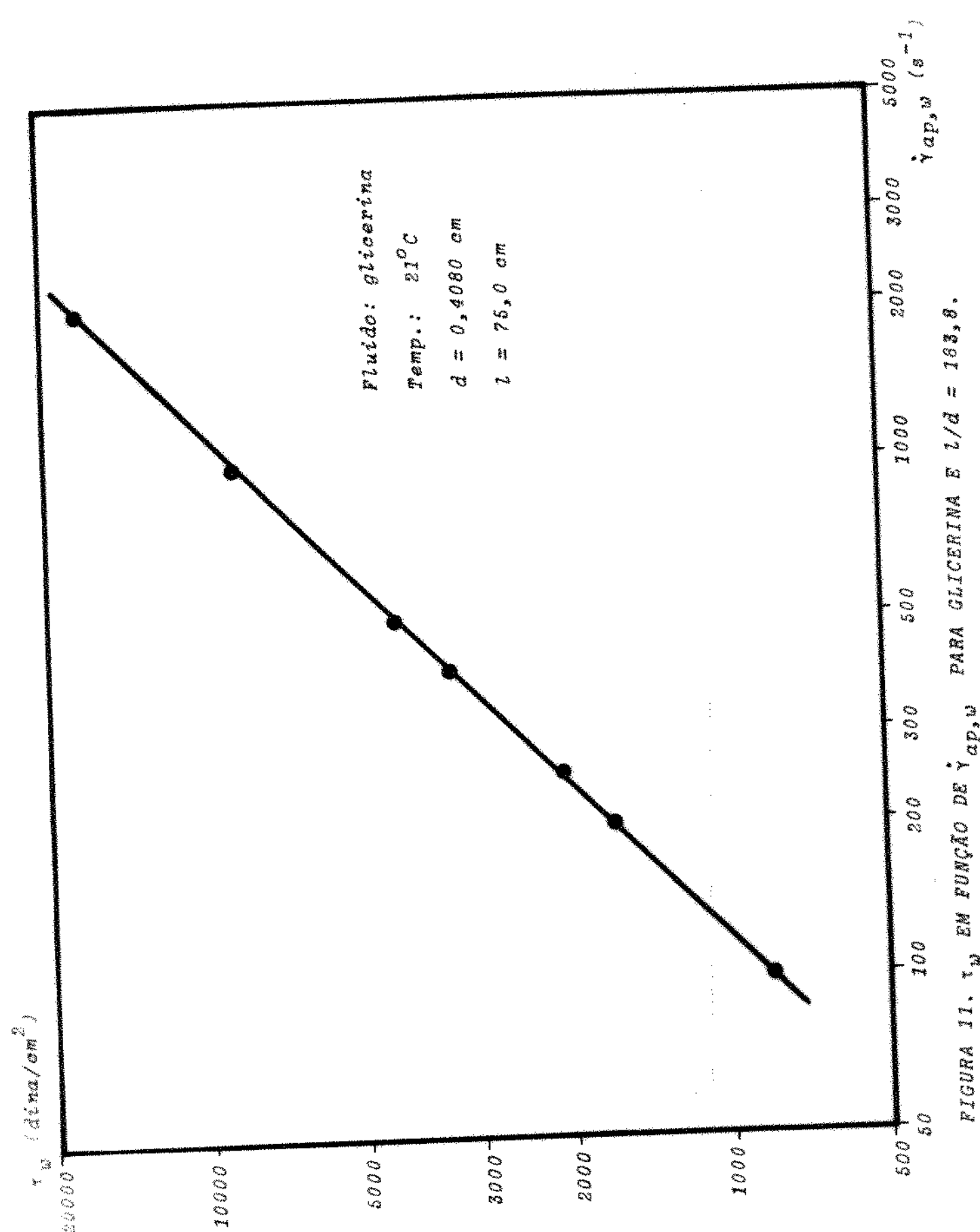


FIGURA 11. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA GLICERINA E $l/d = 183,8$.

FLUIDO: CMC 3%		$l = 25,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_o = 2,1 \text{ Kg}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	F-F _o (Kg)	τ_w (d/cm ²)	N _{Re} (-)
2,0	98,16	9,9	2020	0,10
4,0	196,32	13,2	2693	0,30
5,0	245,40	14,2	2897	0,40
8,0	392,63	18,1	3692	0,90
10,0	490,78	20,1	4100	1,30
20,0	981,59	25,9	5284	3,70
40,0	1963,17	35,4	7222	10,20

TABELA 9. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA SOLUÇÃO DE CMC A 3% COM UM CAPILAR DE $l/d = 61,3$.

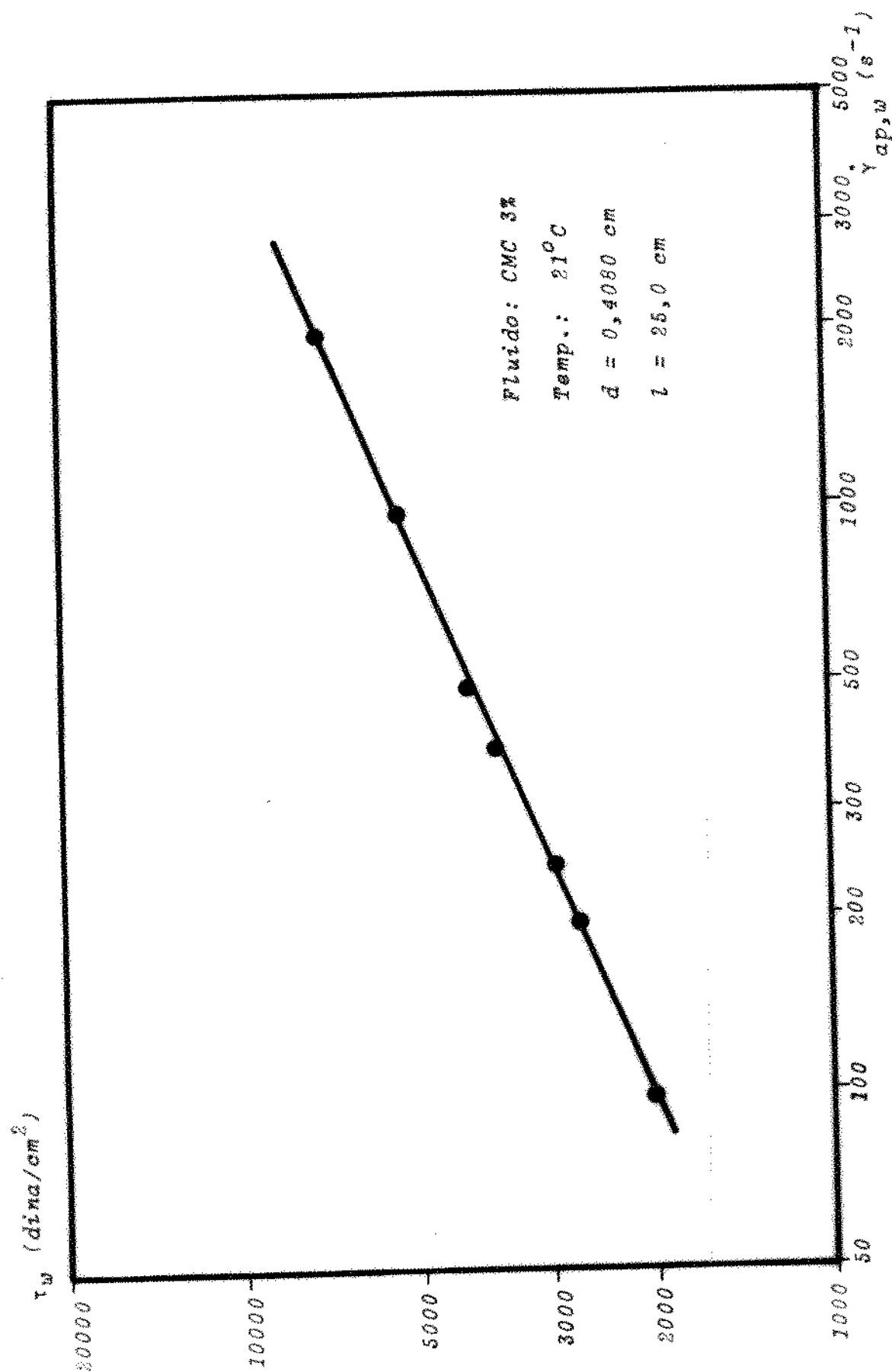


FIGURA 12. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA CMC A 3% E $l/d = 61,3$.

FLUIDO: CMC 3%		$l = 50,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_o = 2,1 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	$F-F_o$ (Kgf)	τ_w (d/cm^2)	N_{Re} (-)
2,0	98,16	20,2	2060	0,10
4,0	196,32	27,4	2795	0,30
5,0	245,40	29,7	3029	0,40
8,0	392,63	37,6	3835	0,90
10,0	490,78	40,7	4151	1,30
20,0	981,59	53,9	5498	3,70
40,0	1963,17	69,9	7130	10,20

TABELA 10. τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA SOLUÇÃO DE CMC A 3% COM UM CAPILAR DE $l/d = 122,5$.

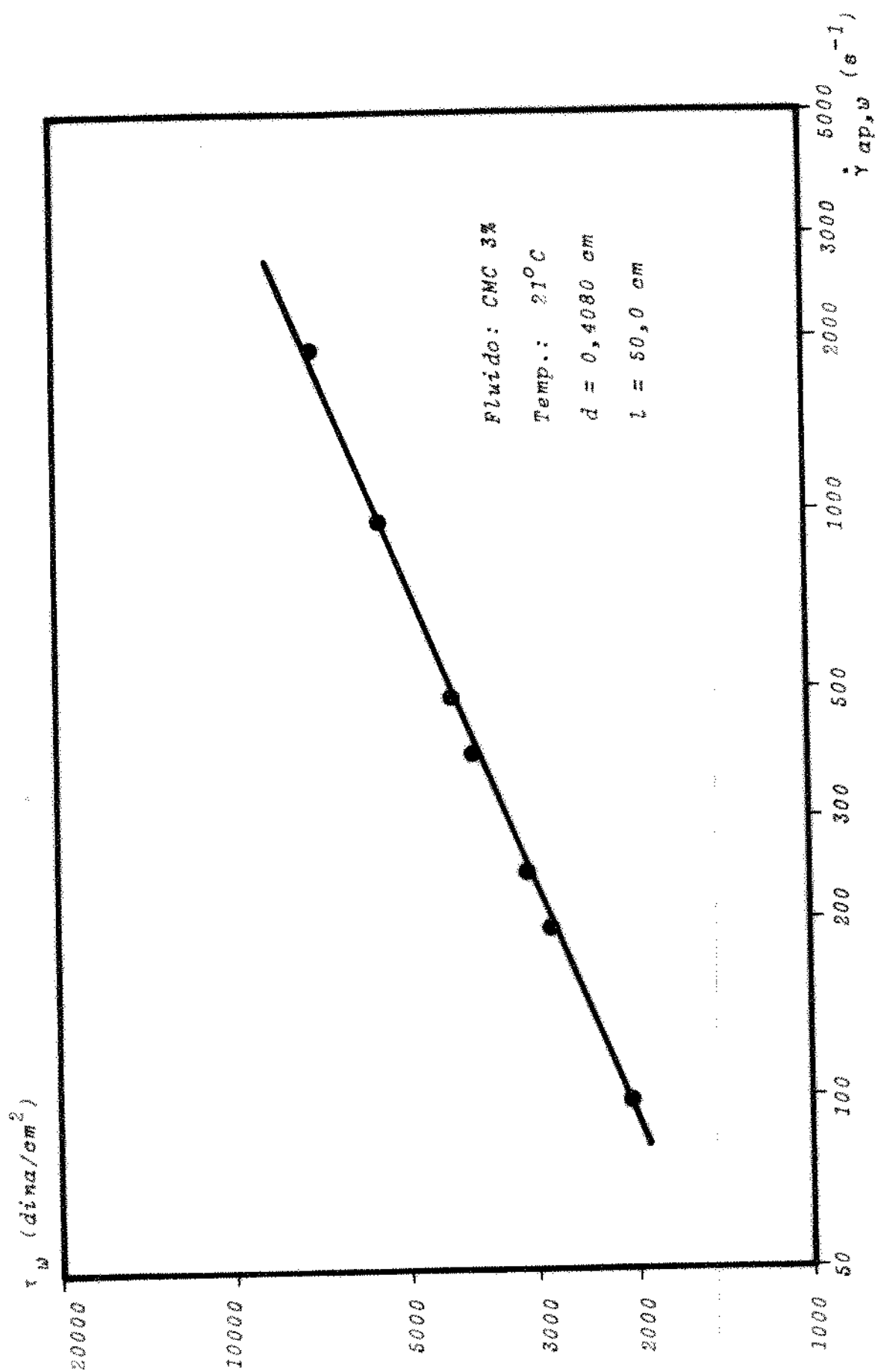


FIGURA 13. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA CMC A 3% E $l/d = 128,5$.

FLUIDO: CMC 3%		$l = 75,0 \text{ cm}$	$d = 0,4080 \text{ cm}$	
TEMPERATURA = 21°C		$F_o = 2,1 \text{ Kgf}$		
V (cm/min)	$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	$F-F_o$ (Kgf)	τ_w (d/cm^2)	N_{Re} (-)
2,0	98,16	28,9	1965	0,10
4,0	196,32	39,6	2693	0,30
5,0	245,40	46,1	3135	0,40
8,0	392,63	53,9	3665	0,90
10,0	490,78	61,4	4175	1,30
20,0	981,59	80,9	5500	3,70
40,0	1963,17	103,9	7065	10,20

TABELA 11 τ_w , $\dot{\gamma}_{ap,w}$ E N_{Re} CALCULADOS A PARTIR DE F E V PARA SOLUÇÃO DE CMC A 3% COM UM CAPILAR DE $l/d = 183,8$.

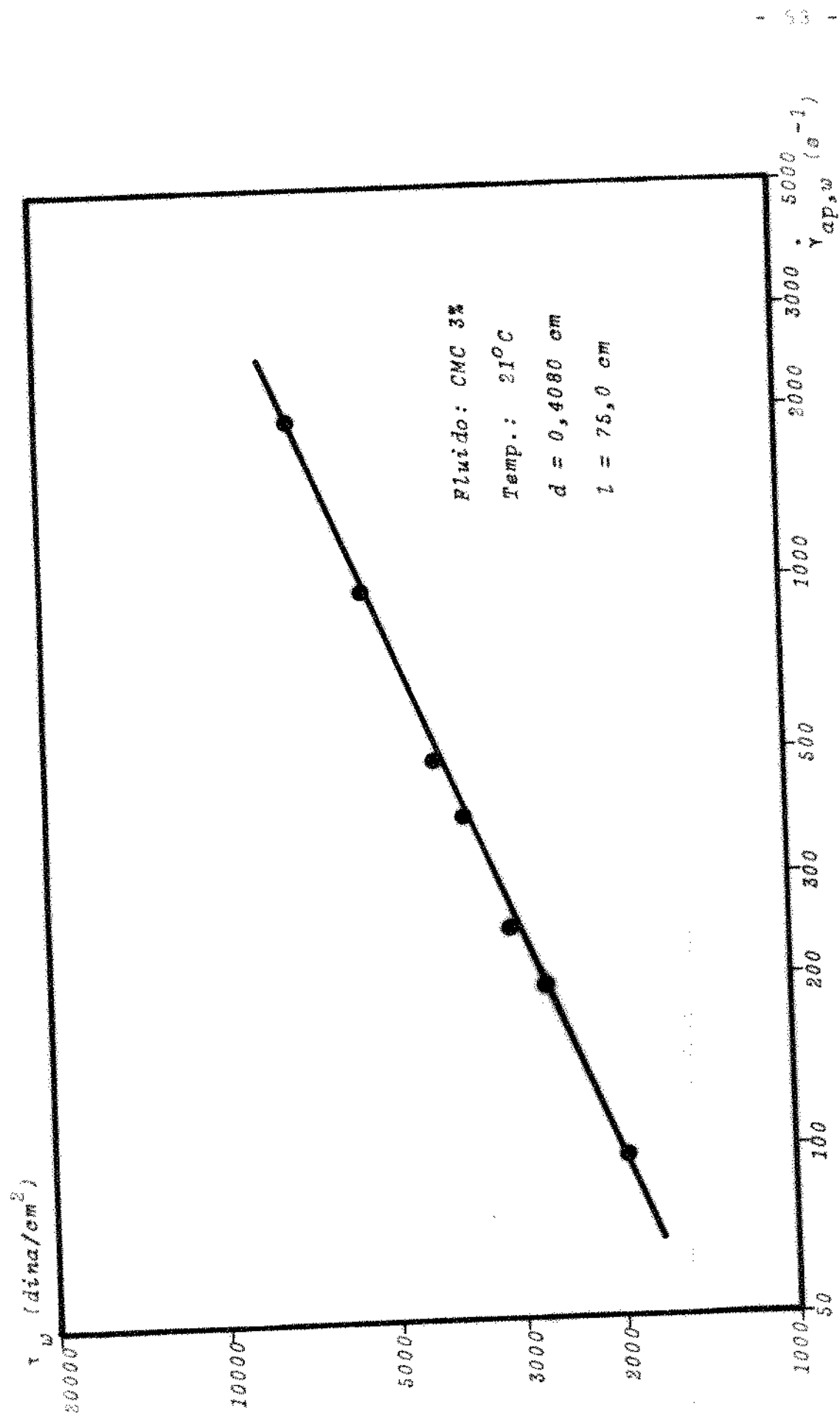


FIGURA 14. τ_w EM FUNÇÃO DE $\dot{\gamma}_{ap,w}$ PARA CMC 3% E $l/d = 183,8$

AMOSTRA: óleo de motor		$d = 0,2663 \text{ cm}$		
TEMPERATURA = 22°C				
l/d	93,90	187,80	281,60	*
K	3,68	3,51	3,51	3,58
n	1,00	1,00	1,00	1,00
r^2	0,99**	1,00**	1,00**	1,00**
F	3030***	24800***	30250***	27100***

* os valores de K, n, r^2 e 'F' foram calculados considerando-se os 3 (três) capilares

** significativo a menos que 0,1%

*** significativo a menos que 1,0%

TABELA 12. K, n, r^2 E F PARA ÓLEO DE MOTOR A 22°C PARA 3 CAPILARES COM l/d ENTRE 93,9 A 281,6.

AMOSTRA: glicerina		$d = 0,4080 \text{ cm}$		
TEMPERATURA = 21°C				
l/d	61,30	122,50	183,80	*
K	8,29	7,99	8,54	8,27
n	1,00	1,00	1,00	1,00
r^2	0,99**	1,00**	0,98**	0,97**
F	78400***	36000***	12300***	8700***

* os valores de K, n, r^2 e 'F' foram calculados considerando-se os 3 (três) capilares

** significativos a menos que 0,1%

*** significativos a menos que 1,0%

TABELA 13. K, n, r^2 E F PARA GLICERINA A 21°C PARA 3 CAPILARES COM l/d ENTRE 61,2 A 183,8.

AMOSTRA: CMC a 3%		$d = 0,4080 \text{ cm}$		
TEMPERATURA = 21°C				
l/d	61,30	122,50	183,80	*
K	283,30	309,00	286,00	292,70
n	0,427	0,417	0,427	0,424
r^2	0,99**	0,99**	0,99**	0,99**
F	3500***	2160***	940***	290***

* os valores de K, n, r^2 e 'F' foram calculados considerando-se os 3 (três) capilares

** significativos a menos que 0,1%

*** significativos a menos que 1,0%

TABELA 14. K, n, r^2 E F PARA SOLUÇÃO DE CMC A 3% PARA 3 CAPILARES COM l/d ENTRE 61,3 A 183,8.

tante próximos da unidade.

b) Influência do fator l/d na determinação dos parâmetros do modelo

Como descrito no item 3.1, existem no capilar regiões de nominadas 'região de entrada' e 'região de saída' nas quais o escoamento é bastante complexo. Os valores calculados neste trabalho para τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ partiram da hipótese de que o comprimento L do capilar era igual à região viscosimétrica, isto é, desprezou-se os comprimentos de entrada e de saída. Quanto aos comprimentos de entrada (l_e), foram calculados e, realmente, encontrou-se valores bastante baixos. Para os ensaios com óleo lubrificante o mesmo variou entre 0,006 e 0,120 cm, sendo que para os ensaios com glicerina o mesmo variou entre 0,007 e 0,122 cm e para os ensaios com a solução de CMC a 3% em água (peso/volume) o comprimento de entrada esteve entre 0,002 a 0,166 cm. Esses valores foram calculados considerando-se uma entrada abrupta no capilar. Essa consideração leva a encontrar valores do comprimento de entrada sensivelmente maiores do que quando se considera uma entrada afunilada (cônica) como foi utilizada neste trabalho.

Nota-se portanto que ao se desconsiderar esse valor não se tem praticamente erro algum (erro máximo menor que 0,5%).

Como pode ser observado nas Tabelas 3 a 11 e nas Figuras 6 a 14 os valores obtidos para τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$ para uma mesma amostra são bastantes próximos quando se compara dois capilares diferentes (l/d diferentes).

As Tabelas 12, 13 e 14 mostram os resultados das regressões lineares calculados a partir da correlação entre $\log$ de τ_w

e $\log \dot{\gamma}_{ap,w}$.

O coeficiente de correlação r^2 de qualquer uma das regressões obtidas é bastante próximo de 1 ou mesmo igual a 1 e os valores das constantes reológicas K e n para um determinado $1/d$ são bastante próximos àqueles obtidos para uma relação diferente de $1/d$ para cada amostra em questão. Nas mesmas tabelas são ainda mostrados os valores de K, n e r^2 calculados considerando-se as 3 relações de $1/d$ sendo os mesmos também bastante próximos dos anteriores.

Além disso, as curvas resultantes (regressões) também possuem valores de distribuição de probabilidade 'F' de Snedecor bem maiores que 10 (290 a 78.400) o que enfatiza a correlação proposta entre τ_w e $\dot{\gamma}_{ap,w}$.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

a) Quanto ao ajuste do modelo aos dados experimentais

Pelo que é mostrado nas Tabelas 12, 13 e 14 e nas Figuras 6 a 14, pode-se concluir que, para as condições experimentais adotadas, o modelo de Ostwald-de Waele representa muito bem o comportamento pseudoplástico da solução aquosa de CMC, e portanto o reômetro é bastante adequado para a caracterização reológica de materiais não-Newtonianos.

b) Quanto ao desempenho do reômetro

De acordo com os dados estatísticos apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14, pode-se concluir que, o desempenho do reômetro é bastante satisfatório, já que os valores dos coeficientes de correlação r^2 e da distribuição de probabilidade 'F' de Snedecor foram significativas a menos que 0,1% e 1,0% respectivamente.

Deve-se observar que o uso deste reômetro, para determinação das propriedades reológicas de fluidos, é um pouco mais trabalhoso se comparado aos equipamentos mais tradicionais, porém há vantagens tanto quanto à larga faixa de utilização como quanto à qualidade dos parâmetros obtidos.

c) Sugestões

O reômetro construído não possui controle de temperatura, o que torna difícil a reprodução de um experimento na mesma temperatura ou com variação controlada da mesma. Sugere-se portanto o desenvolvimento de um controlador de temperatura que ampliaria sobremaneira sua utilidade.

Naturalmente, outros tipos de estudos podem ser desenvolvidos com este equipamento e dentre eles se poderia ressaltar dois de particular importância, que são: estudo da região hidrodinâmica de entrada no escoamento em tubos circulares e determinação de propriedades elásticas dos materiais ensaiados.

Devido à complexidade dos cálculos envolvidos no processamento dos dados experimentais, seria muito útil o acoplamento deste reômetro ao computador PDP 11 do Departamento de Engenharia de Alimentos pois a máquina INSTRON permite uma saída analógica do sinal de força aplicada para produzir o escoamento, enquanto que o computador tem um sistema analógico de aquisição de dados.

- APÊNDICE A -

TABELAS QUE MOSTRAM OS VALORES DA FORÇA (F) EM Kgf E DO NÚMERO DE REYNOLDS (Re) EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS REOLÓGICOS (K E n), DA VELOCIDADE DO PISTÃO (V) EM cm/min E DOS DIÂMETROS DOS CAPILARES (d), CONSIDERANDO UM COMPRIMENTO (L) DE 75,0 cm E MASSA ESPECÍFICA DO MATERIAL IGUAL A 1,0 g/cm³.

EXEMPLO DE EMPREGO DAS TABELAS

Estas tabelas têm a finalidade de, conhecendo-se aproximadamente as propriedades reológicas do material a ser ensaiado, se escolher as faixas de trabalho possíveis para o sistema de capilares.

Considere-se o ensaio de um fluido, do qual a literatura cita os valores de 100 e 0,50 para as suas constantes reológicas K e n respectivamente. O problema está em se encontrar as faixas de trabalho para esse fluido de modo a produzir um escoamento laminar. Pode-se ter como limites de força 50 e 500 Kgf dependendo da célula de carga a ser usada.

Supõe-se o uso da célula de carga de 50 Kgf. Procura-se a tabela, onde $n = 0,50$ e multiplica-se os valores de F por 100 e divide-se os valores de R (N_{Re}) pelo mesmo valor de 100.

As faixas de trabalho possíveis são as seguintes:

A) $d = 0,4080$ e velocidade do pistão (V) entre 0,5 e 10,0 cm/min. Tem-se assim valores de força (F) entre 8,1 e 36,4 Kgf e valores do número de Reynolds (R) entre 0,02 e 2,03.

B) $d = 0,5950$ cm e velocidade do pistão (V) entre 0,5 e 80,0 cm/min. Tem-se então valores de força (F) entre 3,2 e 40,1 Kgf, enquanto que os valores do número de Reynolds (R) estão compreendidos na faixa de 0,01 e 17,8.

Usando a célula de carga de 500 Kgf e usando o mesmo procedimento citado anteriormente, encontra-se as seguintes faixas de trabalho:

C) $d = 0,1652$ cm e velocidade do pistão (V) entre 0,5 e 20,0

cm/min. Tem-se portanto os valores da força (F) compreendidos entre 78,0 e 493,5 Kgf e valores do número de Reynolds (R) na faixa de 0,22 a 54,90.

D) $d = 0,2663$ cm e velocidade do pistão (V) entre 0,5 e 80,0 cm/min, com valores da força (F) entre 23,6 e 299,2 Kgf e valores do número de Reynolds entre 0,07 e 133,20.

Para visualizar melhor os valores das faixas de trabalho para este exemplo, mostra-se a seguir um quadro contendo todos os valores acima e acrescentado dos valores da taxa de deformação aparente ($\dot{\gamma}_{ap,w}$).

d (cm)	0,1652	0,2663	0,4080	0,5950
V (cm/min)	0,5-20,0	0,5-80,0	0,5-10,0	0,5-80,0
F (Kgf)	78 - 494	24 - 300	8 - 37	3 - 40
N_{Re} (-)	0,22-55,0	0,07-133,0	0,02-2,0	0,01-18,0
Célula (Kgf)	500	500	50	50
$\dot{\gamma}_{ap,w}$ (s^{-1})	400-15000	90-14000	25-500	10-1300

TABELA A₀. FAIXAS DE TRABALHO POSSÍVEIS PARA O SISTEMA DE CAPILARES CONSIDERANDO UM FLUIDO COM $K = 100$ E $n = 0,50$.

K= 1

N= .05

V\D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.5327 E-1	.3076 E-1	.1883 E-1	.1220 E-1	.8784 E-2
R=	.3183 E+3	.5064 E+2	.9799 E+1	.2293 E+1	.7623 E+0
1.0 F=	.5515 E-1	.3185 E-1	.1950 E-1	.1263 E-1	.9093 E-2
R=	.1230 E+4	.1957 E+3	.3786 E+2	.8858 E+1	.2945 E+1
2.0 F=	.5709 E-1	.3297 E-1	.2019 E-1	.1308 E-1	.9414 E-2
R=	.4752 E+4	.7560 E+3	.1463 E+3	.3422 E+2	.1138 E+2
4.0 F=	.5911 E-1	.3413 E-1	.2090 E-1	.1354 E-1	.9746 E-2
R=	.1836 E+5	.2921 E+4	.5652 E+3	.1322 E+3	.4397 E+2
5.0 F=	.5977 E-1	.3452 E-1	.2113 E-1	.1369 E-1	.9855 E-2
R=	.2837 E+5	.4514 E+4	.8733 E+3	.2043 E+3	.6794 E+2
8.0 F=	.6119 E-1	.3534 E-1	.2163 E-1	.1402 E-1	.1009 E-1
R=	.7094 E+5	.1129 E+5	.2184 E+4	.5109 E+3	.1699 E+3
10.0 F=	.6188 E-1	.3573 E-1	.2188 E-1	.1418 E-1	.1020 E-1
R=	.1096 E+6	.1744 E+5	.3374 E+4	.7895 E+3	.2625 E+3
20.0 F=	.6406 E-1	.3699 E-1	.2265 E-1	.1468 E-1	.1056 E-1
R=	.4233 E+6	.6738 E+5	.1304 E+5	.3050 E+4	.1014 E+4
40.0 F=	.6632 E-1	.3830 E-1	.2345 E-1	.1519 E-1	.1094 E-1
R=	.1636 E+7	.2603 E+6	.5037 E+5	.1179 E+5	.3919 E+4
80.0 F=	.6866 E-1	.3965 E-1	.2427 E-1	.1573 E-1	.1132 E-1
R=	.6323 E+7	.1006 E+7	.1946 E+6	.4554 E+5	.1514 E+5

K= 1

N= .1

U\D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.7350 E-1	.3967 E-1	.2278 E-1	.1395 E-1	.9619 E-2
R=	.2298 E+3	.3927 E+2	.8099 E+1	.2005 E+1	.6960 E+0
1.0 F=	.7910 E-1	.4252 E-1	.2442 E-1	.1495 E-1	.1031 E-1
R=	.8575 E+3	.1465 E+3	.3023 E+2	.7484 E+1	.2398 E+1
2.0 F=	.8478 E-1	.4557 E-1	.2617 E-1	.1603 E-1	.1105 E-1
R=	.3200 E+4	.5469 E+3	.1128 E+3	.2793 E+2	.5694 E+1
4.0 F=	.9086 E-1	.4884 E-1	.2805 E-1	.1718 E-1	.1164 E-1
R=	.1194 E+5	.2041 E+4	.4210 E+3	.1042 E+3	.3618 E+2
5.0 F=	.9291 E-1	.4995 E-1	.2868 E-1	.1756 E-1	.1211 E-1
R=	.1823 E+5	.3119 E+4	.6434 E+3	.1593 E+3	.5829 E+2
8.0 F=	.9738 E-1	.5235 E-1	.3006 E-1	.1841 E-1	.1269 E-1
R=	.4407 E+5	.7618 E+4	.1571 E+4	.3891 E+3	.1350 E+3
10.0 F=	.9958 E-1	.5353 E-1	.3074 E-1	.1892 E-1	.1298 E-1
R=	.6811 E+5	.1154 E+5	.2401 E+4	.5945 E+3	.2063 E+3
20.0 F=	.1067 E+0	.5737 E-1	.3295 E-1	.2018 E-1	.1391 E-1
R=	.2542 E+6	.4344 E+5	.8961 E+4	.2219 E+4	.7701 E+3
40.0 F=	.1144 E+0	.6149 E-1	.3531 E-1	.2162 E-1	.1491 E-1
R=	.9487 E+6	.1621 E+6	.3344 E+5	.8280 E+4	.2874 E+4
80.0 F=	.1226 E+0	.6590 E-1	.3785 E-1	.2318 E-1	.1598 E-1
R=	.3541 E+7	.6051 E+6	.1248 E+6	.3090 E+5	.1073 E+5

K= 1

N= .15

V\D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.1006 E+0	.5036 E-1	.2713 E-1	.1570 E-1	.1037 E-1
R=	.1685 E+3	.3093 E+2	.6802 E+1	.1782 E+1	.6457 E+0
1.0 F=	.1117 E+0	.5587 E-1	.3010 E-1	.1742 E-1	.1150 E-1
R=	.6074 E+3	.1115 E+3	.2452 E+2	.6425 E+1	.2328 E+1
2.0 F=	.1239 E+0	.6200 E-1	.3340 E-1	.1932 E-1	.1276 E-1
R=	.2190 E+4	.4020 E+3	.8840 E+2	.2316 E+2	.8391 E+1
4.0 F=	.1375 E+0	.6879 E-1	.3706 E-1	.2144 E-1	.1416 E-1
R=	.7894 E+4	.1449 E+4	.3187 E+3	.8350 E+2	.3025 E+2
5.0 F=	.1421 E+0	.7113 E-1	.3832 E-1	.2217 E-1	.1465 E-1
R=	.1193 E+5	.2190 E+4	.4816 E+3	.1262 E+3	.4571 E+2
8.0 F=	.1525 E+0	.7633 E-1	.4112 E-1	.2379 E-1	.1571 E-1
R=	.3846 E+5	.5224 E+4	.1149 E+4	.3010 E+3	.1091 E+3
10.0 F=	.1577 E+0	.7892 E-1	.4252 E-1	.2460 E-1	.1625 E-1
R=	.4300 E+5	.7895 E+4	.1736 E+4	.4548 E+3	.1648 E+3
20.0 F=	.1750 E+0	.8757 E-1	.4717 E-1	.2730 E-1	.1803 E-1
R=	.1550 E+6	.2846 E+5	.6258 E+4	.1640 E+4	.5941 E+3
40.0 F=	.1942 E+0	.9717 E-1	.5234 E-1	.3029 E-1	.2001 E-1
R=	.5588 E+6	.1026 E+6	.2256 E+5	.5911 E+4	.2142 E+4
80.0 F=	.2155 E+0	.1078 E+0	.5808 E-1	.3361 E-1	.2220 E-1
R=	.2015 E+7	.3699 E+6	.8133 E+5	.2131 E+5	.7720 E+4

K= 1

N= .2

V\D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.1361 E+0	.6339 E-1	.3203 E-1	.1752 E-1	.1108 E-1
R=	.1246 E+3	.2457 E+2	.5760 E+1	.1597 E+1	.6039 E+0
1.0 F=	.1563 E+0	.7282 E-1	.3680 E-1	.2012 E-1	.1273 E-1
R=	.4338 E+3	.8556 E+2	.2006 E+2	.5561 E+1	.2103 E+1
2.0 F=	.1796 E+0	.8365 E-1	.4227 E-1	.2311 E-1	.1462 E-1
R=	.1511 E+4	.2979 E+3	.6984 E+2	.1936 E+2	.7323 E+1
4.0 F=	.2063 E+0	.9609 E-1	.4855 E-1	.2655 E-1	.1680 E-1
R=	.5260 E+4	.1037 E+4	.2432 E+3	.6743 E+2	.2550 E+2
5.0 F=	.2157 E+0	.1005 E+0	.5077 E-1	.2776 E-1	.1757 E-1
R=	.7860 E+4	.1550 E+4	.3634 E+3	.1008 E+3	.3811 E+2
8.0 F=	.2369 E+0	.1104 E+0	.5577 E-1	.3050 E-1	.1930 E-1
R=	.1832 E+5	.3613 E+4	.8469 E+3	.2348 E+3	.8880 E+2
10.0 F=	.2478 E+0	.1154 E+0	.5832 E-1	.3189 E-1	.2018 E-1
R=	.2737 E+5	.5398 E+4	.1266 E+4	.3509 E+3	.1327 E+3
20.0 F=	.2846 E+0	.1326 E+0	.6699 E-1	.3663 E-1	.2318 E-1
R=	.9531 E+5	.1880 E+5	.4407 E+4	.1222 E+4	.4621 E+3
40.0 F=	.3269 E+0	.1523 E+0	.7695 E-1	.4208 E-1	.2663 E-1
R=	.3319 E+6	.6546 E+5	.1535 E+5	.4255 E+4	.1609 E+4
80.0 F=	.3755 E+0	.1749 E+0	.8839 E-1	.4833 E-1	.3058 E-1
R=	.1156 E+7	.2279 E+6	.5344 E+5	.1482 E+5	.5603 E+4

K= 1

N= .25

V\U	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.1831 E+0	.7941 E-1	.3764 E-1	.1945 E-1	.1179 E-1
R=	.9257 E+2	.1961 E+2	.4902 E+1	.1438 E+1	.5677 E+0
1.0 F=	.2178 E+0	.9443 E-1	.4476 E-1	.2313 E-1	.1402 E-1
R=	.3114 E+3	.6597 E+2	.1649 E+2	.4837 E+1	.1910 E+1
2.0 F=	.2590 E+0	.1123 E+0	.5323 E-1	.2750 E-1	.1667 E-1
R=	.1047 E+4	.2219 E+3	.5546 E+2	.1627 E+2	.6423 E+1
4.0 F=	.3080 E+0	.1335 E+0	.6330 E-1	.3271 E-1	.1983 E-1
R=	.3523 E+4	.7464 E+3	.1865 E+3	.5473 E+2	.2160 E+2
5.0 F=	.3256 E+0	.1412 E+0	.6693 E-1	.3458 E-1	.2097 E-1
R=	.5205 E+4	.1103 E+4	.2756 E+3	.8087 E+2	.3193 E+2
8.0 F=	.3662 E+0	.1588 E+0	.7527 E-1	.3869 E-1	.2358 E-1
R=	.1135 E+5	.2510 E+4	.6274 E+3	.1841 E+3	.7267 E+2
10.0 F=	.3873 E+0	.1679 E+0	.7959 E-1	.4113 E-1	.2493 E-1
R=	.1751 E+5	.3710 E+4	.9272 E+3	.2720 E+3	.1074 E+3
20.0 F=	.4605 E+0	.1997 E+0	.9465 E-1	.4891 E-1	.2965 E-1
R=	.5889 E+5	.1248 E+5	.3119 E+4	.9150 E+3	.3612 E+3
40.0 F=	.5477 E+0	.2375 E+0	.1126 E+0	.5816 E-1	.3526 E-1
R=	.1981 E+6	.4197 E+5	.1049 E+5	.3078 E+4	.1215 E+4
80.0 F=	.6513 E+0	.2824 E+0	.1339 E+0	.6917 E-1	.4193 E-1
R=	.6663 E+6	.1412 E+6	.3528 E+5	.1035 E+5	.4086 E+4

K= 1

N= .3

V\N	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.2456 E+0	.9914 E-1	.4408 E-1	.2132 E-1	.1250 E-1
R=	.6901 E+2	.1571 E+2	.4185 E+1	.1299 E+1	.5355 E+0
1.0 F=	.3024 E+0	.1221 E+0	.5426 E-1	.2650 E-1	.1539 E-1
R=	.2242 E+3	.5104 E+2	.1360 E+2	.4222 E+1	.1740 E+1
2.0 F=	.3723 E+0	.1503 E+0	.6681 E-1	.3262 E-1	.1894 E-1
R=	.7285 E+3	.1658 E+3	.4419 E+2	.1372 E+2	.5852 E+1
4.0 F=	.4583 E+0	.1850 E+0	.8225 E-1	.4016 E-1	.2332 E-1
R=	.2367 E+4	.5387 E+3	.1435 E+3	.4457 E+2	.1836 E+2
5.0 F=	.4900 E+0	.1978 E+0	.8794 E-1	.4294 E-1	.2494 E-1
R=	.3459 E+4	.7873 E+3	.2098 E+3	.6513 E+2	.2684 E+2
6.0 F=	.5642 E+0	.2278 E+0	.1013 E+0	.4944 E-1	.2871 E-1
R=	.7690 E+4	.1750 E+4	.4664 E+3	.1448 E+3	.5967 E+2
10.0 F=	.6033 E+0	.2435 E+0	.1083 E+0	.5287 E-1	.3070 E-1
R=	.1124 E+5	.2558 E+4	.6815 E+3	.2116 E+3	.8719 E+2
20.0 F=	.7428 E+0	.2998 E+0	.1333 E+0	.6509 E-1	.3780 E-1
R=	.3651 E+5	.8310 E+4	.2214 E+4	.6875 E+3	.2833 E+3
40.0 F=	.9144 E+0	.3691 E+0	.1641 E+0	.8013 E-1	.4654 E-1
R=	.1186 E+6	.2700 E+5	.7194 E+4	.2234 E+4	.9204 E+3
80.0 F=	.1126 E+1	.4544 E+0	.2020 E+0	.9865 E-1	.5729 E-1
R=	.3854 E+6	.8773 E+5	.2337 E+5	.7257 E+4	.2990 E+4

K= 1

N= .35

U/D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.3286 E+0	.1235 E+0	.5149 E-1	.2376 E-1	.1322 E-1
R=	.5157 E+2	.1261 E+2	.3582 E+1	.1177 E+1	.5062 E+0
1.0 F=	.4108 E+0	.1574 E+0	.6563 E-1	.3028 E-1	.1685 E-1
R=	.1619 E+3	.3957 E+2	.1124 E+2	.3694 E+1	.1589 E+1
2.0 F=	.5338 E+0	.2006 E+0	.8365 E-1	.3860 E-1	.2148 E-1
R=	.5030 E+3	.1242 E+3	.3528 E+2	.1159 E+2	.4986 E+1
4.0 F=	.6804 E+0	.2557 E+0	.1066 E+0	.4920 E-1	.2737 E-1
R=	.1594 E+4	.3898 E+3	.1107 E+3	.3638 E+2	.1565 E+2
5.0 F=	.7357 E+0	.2764 E+0	.1153 E+0	.5319 E-1	.2960 E-1
R=	.2304 E+4	.5633 E+3	.1600 E+3	.5257 E+2	.2261 E+2
8.0 F=	.8672 E+0	.3259 E+0	.1359 E+0	.6270 E-1	.3489 E-1
R=	.5003 E+4	.1223 E+4	.3475 E+3	.1142 E+3	.4910 E+2
10.0 F=	.9377 E+0	.3523 E+0	.1469 E+0	.6780 E-1	.3772 E-1
R=	.7230 E+4	.1768 E+4	.5021 E+3	.1650 E+3	.7096 E+2
20.0 F=	.1195 E+1	.4491 E+0	.1873 E+0	.8641 E-1	.4808 E-1
R=	.2269 E+5	.5548 E+4	.1576 E+4	.5178 E+3	.2227 E+3
40.0 F=	.1523 E+1	.5724 E+0	.2387 E+0	.1101 E+0	.6128 E-1
R=	.7121 E+5	.1741 E+5	.4946 E+4	.1625 E+4	.6989 E+3
80.0 F=	.1942 E+1	.7295 E+0	.3042 E+0	.1404 E+0	.7810 E-1
R=	.2235 E+6	.5464 E+5	.1552 E+5	.5100 E+4	.2193 E+4

K= 1 N= .4

UAD	0.1452	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.4390 E+0	.1535 E+0	.6006 E-1	.2619 E-1	.1396 E-1
R=	.3361 E+2	.1014 E+2	.3071 E+1	.1068 E+1	.4794 E+0
1.0 F=	.5792 E+0	.2026 E+0	.7925 E-1	.3456 E-1	.1842 E-1
R=	.1170 E+3	.3074 E+2	.9309 E+1	.3237 E+1	.1453 E+1
2.0 F=	.7643 E+0	.2673 E+0	.1046 E+0	.4560 E-1	.2430 E-1
R=	.3548 E+3	.9319 E+2	.2822 E+2	.9812 E+1	.4405 E+1
4.0 F=	.1008 E+1	.3527 E+0	.1380 E+0	.6016 E-1	.3207 E-1
R=	.1076 E+4	.2825 E+3	.8555 E+2	.2974 E+2	.1335 E+2
5.0 F=	.1103 E+1	.3857 E+0	.1509 E+0	.6578 E-1	.3506 E-1
R=	.1537 E+4	.4037 E+3	.1223 E+3	.4251 E+2	.1908 E+2
8.0 F=	.1331 E+1	.4654 E+0	.1821 E+0	.7939 E-1	.4231 E-1
R=	.3260 E+4	.8564 E+3	.2593 E+3	.9017 E+2	.4048 E+2
10.0 F=	.1455 E+1	.5089 E+0	.1991 E+0	.8680 E-1	.4627 E-1
R=	.4659 E+4	.1224 E+4	.3706 E+3	.1289 E+3	.5785 E+2
20.0 F=	.1920 E+1	.6715 E+0	.2627 E+0	.1145 E+0	.6105 E-1
R=	.1412 E+5	.3710 E+4	.1123 E+4	.3906 E+3	.1754 E+3
40.0 F=	.2533 E+1	.8860 E+0	.3466 E+0	.1511 E+0	.8055 E-1
R=	.4282 E+5	.1125 E+5	.3406 E+4	.1184 E+4	.5316 E+3
80.0 F=	.3342 E+1	.1169 E+1	.4573 E+0	.1994 E+0	.1063 E+0
R=	.1298 E+6	.3409 E+5	.1032 E+5	.3590 E+4	.1612 E+4

K= 1

N= .45

U/D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.5856 E+0	.1907 E+0	.6996 E-1	.2883 E-1	.1472 E-1
R=	.2894 E+2	.8165 E+1	.2636 E+1	.9699 E+0	.4546 E+0
1.0 F=	.7999 E+0	.2605 E+0	.9557 E-1	.3938 E-1	.2011 E-1
R=	.8474 E+2	.2391 E+2	.7719 E+1	.2840 E+1	.1331 E+1
2.0 F=	.1093 E+1	.3558 E+0	.1305 E+0	.5379 E-1	.2747 E-1
R=	.2481 E+3	.7001 E+2	.2260 E+2	.8316 E+1	.3897 E+1
4.0 F=	.4493 E+1	.4860 E+0	.1783 E+0	.7348 E-1	.3752 E-1
R=	.7266 E+3	.2050 E+3	.6618 E+2	.2435 E+2	.1141 E+2
6.0 F=	.1650 E+1	.5374 E+0	.1972 E+0	.8124 E-1	.4149 E-1
R=	.1027 E+4	.2897 E+3	.9353 E+2	.3441 E+2	.1613 E+2
8.0 F=	.2039 E+1	.6639 E+0	.2436 E+0	.1004 E+0	.5126 E-1
R=	.2127 E+4	.6003 E+3	.1938 E+3	.7131 E+2	.3342 E+2
10.0 F=	.2254 E+1	.7341 E+0	.2693 E+0	.1110 E+0	.5667 E-1
R=	.3007 E+4	.8483 E+3	.2739 E+3	.1008 E+3	.4723 E+2
20.0 F=	.3080 E+1	.1003 E+1	.3679 E+0	.1516 E+0	.7741 E-1
R=	.8804 E+4	.2484 E+4	.8020 E+3	.2951 E+3	.1383 E+3
40.0 F=	.4207 E+1	.1370 E+1	.5026 E+0	.2071 E+0	.1058 E+0
R=	.2578 E+5	.7274 E+4	.2348 E+4	.8640 E+3	.4049 E+3
80.0 F=	.5747 E+1	.1871 E+1	.6866 E+0	.2829 E+0	.1445 E+0
R=	.7549 E+5	.2130 E+5	.6876 E+4	.2530 E+4	.1186 E+4

K= 1

N= .5

U\X	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.7803 E+0	.2365 E+0	.8141 E-1	.3170 E-1	.1551 E-1
R=	.3171 E+2	.6581 E+1	.2265 E+1	.8820 E+0	.4315 E+0
1.0 F=	.1104 E+1	.3343 E+0	.1151 E+0	.4483 E-1	.2193 E-1
R=	.6141 E+2	.1862 E+2	.6407 E+1	.2495 E+1	.1220 E+1
2.0 F=	.1561 E+1	.4731 E+0	.1628 E+0	.6339 E-1	.3101 E-1
R=	.1737 E+3	.5265 E+2	.1812 E+2	.7056 E+1	.3452 E+1
4.0 F=	.2207 E+1	.6690 E+0	.2303 E+0	.8965 E-1	.4386 E-1
R=	.4913 E+3	.1489 E+3	.5125 E+2	.1996 E+2	.9763 E+1
5.0 F=	.2468 E+1	.7480 E+0	.2574 E+0	.1002 E+0	.4903 E-1
R=	.6866 E+3	.2081 E+3	.7163 E+2	.2789 E+2	.1364 E+2
8.0 F=	.3121 E+1	.9461 E+0	.3256 E+0	.1268 E+0	.6202 E-1
R=	.1390 E+4	.4212 E+3	.1450 E+3	.5645 E+2	.2761 E+2
10.0 F=	.3490 E+1	.1058 E+1	.3641 E+0	.1418 E+0	.6935 E-1
R=	.1942 E+4	.5887 E+3	.2026 E+3	.7889 E+2	.3859 E+2
20.0 F=	.4933 E+1	.1496 E+1	.5149 E+0	.2005 E+0	.9807 E-1
R=	.5493 E+4	.1665 E+4	.5730 E+3	.2231 E+3	.1092 E+3
40.0 F=	.6980 E+1	.2116 E+1	.7281 E+0	.2835 E+0	.1387 E+0
R=	.1354 E+5	.4709 E+4	.1621 E+4	.6311 E+3	.3087 E+3
80.0 F=	.9871 E+1	.2992 E+1	.1030 E+1	.4009 E+0	.1961 E+0
R=	.4394 E+5	.1332 E+5	.4584 E+4	.1785 E+4	.8732 E+3

K= 1

N= .55

WLB	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.1039 E+1	.2932 E+0	.9465 E-1	.3483 E-1	.1632 E-1
R=	.1630 E+2	.5309 E+1	.1948 E+1	.8027 E+0	.4099 E+0
1.0 F=	.1521 E+1	.4293 E+0	.1386 E+0	.5099 E-1	.2390 E-1
R=	.4435 E+2	.1450 E+2	.5322 E+1	.2193 E+1	.1120 E+1
2.0 F=	.2227 E+1	.6265 E+0	.2029 E+0	.7465 E-1	.3499 E-1
R=	.1217 E+3	.3963 E+2	.1454 E+2	.5991 E+1	.3059 E+1
4.0 F=	.3261 E+1	.9201 E+0	.2971 E+0	.1093 E+0	.5122 E-1
R=	.3325 E+3	.1083 E+3	.3973 E+2	.1637 E+2	.8358 E+1
6.0 F=	.3687 E+1	.1040 E+1	.3358 E+0	.1236 E+0	.5791 E-1
R=	.1095 E+3	.1493 E+3	.5490 E+2	.2262 E+2	.1155 E+2
8.0 F=	.4774 E+1	.1347 E+1	.4349 E+0	.1600 E+0	.7499 E-1
R=	.2904 E+3	.2953 E+3	.1085 E+3	.4472 E+2	.2284 E+2
10.0 F=	.5390 E+1	.1523 E+1	.4917 E+0	.1809 E+0	.8479 E-1
R=	.1255 E+4	.4088 E+3	.1500 E+3	.6180 E+2	.3156 E+2
20.0 F=	.7903 E+1	.2230 E+1	.7199 E+0	.2649 E+0	.1241 E+0
R=	.3430 E+4	.1117 E+4	.4098 E+3	.1689 E+3	.8622 E+2
40.0 F=	.1157 E+2	.3265 E+1	.1054 E+1	.3878 E+0	.1817 E+0
R=	.9371 E+4	.3051 E+4	.1120 E+4	.4613 E+3	.2356 E+3
60.0 F=	.1654 E+2	.4780 E+1	.1543 E+1	.5678 E+0	.2661 E+0
R=	.2560 E+5	.8337 E+4	.3059 E+4	.1260 E+4	.6436 E+3

K= 1

N= .6

	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.0 F=	.1383 E+1	.3632 E+0	.1100 E+0	.3824 E-1	.1717 E-1
R=	.1235 E+2	.4285 E+1	.1676 E+1	.7309 E+0	.3896 E+0
1.0 F=	.2096 E+1	.5505 E+0	.1667 E+0	.5796 E-1	.2602 E-1
R=	.3233 E+2	.1131 E+2	.4424 E+1	.1929 E+1	.1028 E+1
2.0 F=	.3177 E+1	.8344 E+0	.2527 E+0	.8785 E-1	.3944 E-1
R=	.8533 E+2	.2985 E+2	.1167 E+2	.5091 E+1	.2713 E+1
3.0 F=	.4815 E+1	.1265 E+1	.3030 E+0	.1332 E+0	.5978 E-1
R=	.2252 E+3	.7876 E+2	.3081 E+2	.1343 E+2	.7161 E+1
4.0 F=	.5500 E+1	.1436 E+1	.4378 E+0	.1522 E+0	.6835 E-1
R=	.3077 E+3	.1076 E+3	.4211 E+2	.1836 E+2	.9706 E+1
5.0 F=	.7298 E+1	.1917 E+1	.5805 E+0	.2018 E+0	.9062 E-1
R=	.5942 E+3	.2079 E+3	.8131 E+2	.3545 E+2	.1890 E+2
10.0 F=	.8344 E+1	.2192 E+1	.6636 E+0	.2307 E+0	.1036 E+0
R=	.8122 E+3	.2841 E+3	.1111 E+3	.4845 E+2	.2583 E+2
20.0 F=	.1265 E+2	.3322 E+1	.1006 E+1	.3497 E+0	.1570 E+0
R=	.2143 E+4	.7497 E+3	.2933 E+3	.1279 E+3	.6816 E+2
40.0 F=	.1917 E+2	.5035 E+1	.1525 E+1	.5301 E+0	.2380 E+0
R=	.5656 E+4	.1978 E+4	.7739 E+3	.3374 E+3	.1799 E+3
80.0 F=	.2905 E+2	.7631 E+1	.2311 E+1	.8035 E+0	.3608 E+0
R=	.1493 E+5	.5221 E+4	.2042 E+4	.8905 E+3	.4747 E+3

K= 1

N= .65

QND	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.1839 E+1	.4497 E+0	.1277 E+0	.4197 E-1	.1603 E-1
R=	.7211 E+1	.3461 E+1	.1443 E+1	.6660 E+0	.3705 E+0
1.0 F=	.3886 E+1	.7056 E+0	.2004 E+0	.6585 E-1	.2832 E-1
R=	.2348 E+2	.8023 E+1	.3679 E+1	.1698 E+1	.9446 E+0
2.0 F=	.4828 E+1	.1107 E+1	.3145 E+0	.1033 E+0	.4444 E-1
R=	.5985 E+2	.2249 E+2	.9379 E+1	.4328 E+1	.2408 E+1
4.0 F=	.7106 E+1	.1737 E+1	.4935 E+0	.1621 E+0	.6974 E-1
R=	.1526 E+3	.5733 E+2	.2391 E+2	.1103 E+2	.6138 E+1
5.0 F=	.8215 E+1	.2009 E+1	.5705 E+0	.1875 E+0	.8063 E-1
R=	.2062 E+3	.7748 E+2	.3231 E+2	.1491 E+2	.8295 E+1
8.0 F=	.1115 E+2	.2726 E+1	.7744 E+0	.2544 E+0	.1094 E+0
R=	.3889 E+3	.1461 E+3	.6094 E+2	.2812 E+2	.1565 E+2
10.0 F=	.1289 E+2	.3152 E+1	.8953 E+0	.2941 E+0	.1265 E+0
R=	.5256 E+3	.1975 E+3	.8237 E+2	.3801 E+2	.2115 E+2
20.0 F=	.2023 E+2	.4946 E+1	.1405 E+1	.4616 E+0	.1985 E+0
R=	.1340 E+4	.5035 E+3	.2100 E+3	.9688 E+2	.5390 E+2
40.0 F=	.3174 E+2	.7760 E+1	.2204 E+1	.7243 E+0	.3115 E+0
R=	.3416 E+4	.1283 E+4	.5352 E+3	.2470 E+3	.1374 E+3
80.0 F=	.4780 E+2	.1218 E+2	.3459 E+1	.1137 E+1	.4888 E+0
R=	.8707 E+4	.3272 E+4	.1364 E+4	.6295 E+3	.3503 E+3

R= 1

N= .7

U/D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.2445 E+1	.5565 E+0	.1483 E+0	.4603 E-1	.1897 E-1
R=	.4928 E+1	.2797 E+1	.1243 E+1	.6071 E+0	.3528 E+0
1.0 F=	.3972 E+1	.9040 E+0	.2409 E+0	.7478 E-1	.3081 E-1
R=	.1706 E+2	.6886 E+1	.3061 E+1	.1495 E+1	.8681 E+0
2.0 F=	.6452 E+1	.1469 E+1	.3913 E+0	.1215 E+0	.5006 E-1
R=	.4200 E+2	.1695 E+2	.7538 E+1	.3681 E+1	.2138 E+1
4.0 F=	.1048 E+2	.2386 E+1	.6356 E+0	.1974 E+0	.8132 E-1
R=	.1034 E+3	.4175 E+2	.1856 E+2	.9063 E+1	.5263 E+1
5.0 F=	.1225 E+2	.2789 E+1	.7431 E+0	.2307 E+0	.9507 E-1
R=	.1387 E+3	.5580 E+2	.2481 E+2	.1211 E+2	.7035 E+1
6.0 F=	.1703 E+2	.3875 E+1	.1033 E+1	.3206 E+0	.1321 E+0
R=	.2547 E+3	.1028 E+3	.4570 E+2	.2232 E+2	.1296 E+2
10.0 F=	.1991 E+2	.4531 E+1	.1207 E+1	.3748 E+0	.1544 E+0
R=	.3404 E+3	.1374 E+3	.6108 E+2	.2982 E+2	.1732 E+2
20.0 F=	.3239 E+2	.7360 E+1	.1961 E+1	.6089 E+0	.2509 E+0
R=	.8381 E+3	.3383 E+3	.1504 E+3	.7344 E+2	.4265 E+2
40.0 F=	.5253 E+2	.1196 E+2	.3186 E+1	.9891 E+0	.4076 E+0
R=	.2064 E+4	.8330 E+3	.3703 E+3	.1808 E+3	.1050 E+3
80.0 F=	.9554 E+2	.1942 E+2	.5175 E+1	.1607 E+1	.6621 E+0
R=	.5081 E+4	.2051 E+4	.9119 E+3	.4452 E+3	.2586 E+3

N= 1

N= .75

VAL	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.3 F=	.3247 E+1	.3884 E+0	.1720 E+0	.5048 E-1	.1993 E-1
R=	.5213 E+1	.2260 E+1	.1071 E+1	.5536 E+0	.3356 E+0
1.0 F=	.5464 E+1	.1158 E+1	.2893 E+0	.8489 E-1	.3351 E-1
R=	.1240 E+2	.5376 E+1	.2548 E+1	.1317 E+1	.7982 E+0
2.0 F=	.9190 E+1	.1947 E+1	.4866 E+0	.1428 E+0	.5636 E-1
R=	.2949 E+2	.1279 E+2	.6060 E+1	.3132 E+1	.1898 E+1
4.0 F=	.1546 E+2	.3275 E+1	.8184 E+0	.2401 E+0	.9479 E-1
R=	.7013 E+2	.3041 E+2	.1441 E+2	.7448 E+1	.4515 E+1
6.0 F=	.1827 E+2	.3871 E+1	.9675 E+0	.2839 E+0	.1121 E+0
R=	.9270 E+2	.4020 E+2	.1905 E+2	.9844 E+1	.5968 E+1
8.0 F=	.2599 E+2	.5507 E+1	.1376 E+1	.4038 E+0	.1594 E+0
R=	.1668 E+3	.7233 E+2	.3428 E+2	.1771 E+2	.1074 E+2
10.0 F=	.3073 E+2	.6510 E+1	.1627 E+1	.4774 E+0	.1885 E+0
R=	.2205 E+3	.9560 E+2	.4531 E+2	.2341 E+2	.1419 E+2
20.0 F=	.5168 E+2	.1095 E+2	.2736 E+1	.8029 E+0	.3169 E+0
R=	.5244 E+3	.2274 E+3	.1078 E+3	.5569 E+2	.3376 E+2
40.0 F=	.8691 E+2	.1841 E+2	.4602 E+1	.1350 E+1	.5330 E+0
R=	.1247 E+4	.5408 E+3	.2563 E+3	.1324 E+3	.8029 E+2
80.0 F=	.1462 E+3	.3097 E+2	.7740 E+1	.2271 E+1	.8964 E+0
R=	.2966 E+4	.1286 E+4	.6096 E+3	.3150 E+3	.1910 E+3

R- 1

N= .8

VAL	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.0 F=	.4816 E+1	.8513 E+0	.1996 E+0	.5533 E-1	.2093 E-1
R=	.3923 E+1	.1828 E+1	.9235 E+0	.5050 E+0	.3195 E+0
1.0 F=	.7515 E+1	.1482 E+1	.3475 E+0	.9634 E-1	.3643 E-1
R=	.9014 E+1	.4199 E+1	.2122 E+1	.1160 E+1	.7341 E+0
2.0 F=	.1308 E+2	.2581 E+1	.6050 E+0	.1677 E+0	.6343 E-1
R=	.2071 E+2	.9646 E+1	.4874 E+1	.2663 E+1	.1687 E+1
4.0 F=	.2276 E+2	.4493 E+1	.1053 E+1	.2921 E+0	.1104 E+0
R=	.4757 E+2	.2216 E+2	.1120 E+2	.6123 E+1	.3875 E+1
6.0 F=	.5727 E+2	.5371 E+1	.1259 E+1	.3491 E+0	.1320 E+0
R=	.6218 E+2	.2897 E+2	.1464 E+2	.6003 E+1	.5064 E+1
8.0 F=	.3967 E+2	.7823 E+1	.1834 E+1	.5085 E+0	.1923 E+0
R=	.4093 E+3	.5091 E+2	.2573 E+2	.1407 E+2	.6902 E+1
10.0 F=	.4742 E+2	.9352 E+1	.2192 E+1	.6079 E+0	.2297 E+0
R=	.1429 E+3	.6655 E+2	.3363 E+2	.1839 E+2	.1163 E+2
20.0 F=	.8256 E+2	.1628 E+2	.3817 E+1	.1058 E+1	.4002 E+0
R=	.3232 E+3	.1529 E+3	.7725 E+2	.4224 E+2	.2673 E+2
40.0 F=	.1437 E+3	.2835 E+2	.6646 E+1	.1843 E+1	.6969 E+0
R=	.7340 E+3	.3512 E+3	.1775 E+3	.9704 E+2	.6141 E+2
60.0 F=	.2303 E+3	.4936 E+2	.1157 E+2	.3208 E+1	.1213 E+1
R=	.1732 E+4	.8069 E+3	.4077 E+3	.2229 E+3	.1411 E+3

K= 1

N= .85

V D	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.5 F=	.3733 E+1	.1053 E+1	.2314 E+0	.6064 E-1	.2197 E-1
R=	.2954 E+1	.1478 E+1	.7962 E+0	.4607 E+0	.3043 E+0
1.0 F=	.1033 E+2	.1897 E+1	.4172 E+0	.1093 E+0	.3960 E-1
R=	.4555 E+1	.3280 E+1	.1767 E+1	.1022 E+1	.6754 E+0
2.0 F=	.3863 E+2	.3420 E+1	.7320 E+0	.1970 E+0	.7138 E-1
R=	.1409 E+2	.7279 E+1	.3921 E+1	.2269 E+1	.1499 E+1
4.0 F=	.3357 E+2	.6164 E+1	.1355 E+1	.3551 E+0	.1287 E+0
R=	.3228 E+2	.1615 E+2	.8702 E+1	.5035 E+1	.3326 E+1
5.0 F=	.4038 E+2	.7451 E+1	.1639 E+1	.4293 E+0	.1555 E+0
R=	.4172 E+2	.2088 E+2	.1125 E+2	.6508 E+1	.4299 E+1
8.0 F=	.6051 E+2	.1111 E+2	.2443 E+1	.6401 E+0	.2319 E+0
R=	.7163 E+2	.3585 E+2	.1931 E+2	.1117 E+2	.7380 E+1
10.0 F=	.7315 E+2	.1343 E+2	.2953 E+1	.7738 E+0	.2803 E+0
R=	.9289 E+2	.4633 E+2	.2496 E+2	.1444 E+2	.9540 E+1
15.0 F=	.1319 E+3	.2421 E+2	.5324 E+1	.1395 E+1	.5053 E+0
R=	.2055 E+3	.1028 E+3	.5539 E+2	.3205 E+2	.2117 E+2
20.0 F=	.2377 E+3	.4364 E+2	.9596 E+1	.2514 E+1	.9108 E+0
R=	.4060 E+3	.2282 E+3	.1229 E+3	.7112 E+2	.4698 E+2
30.0 F=	.4284 E+3	.7865 E+2	.1730 E+2	.4532 E+1	.1642 E+1
R=	.1012 E+4	.5063 E+3	.2728 E+3	.1578 E+3	.1043 E+3

		K= 1		N= .9			
V=		0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920	
0.0	F=	.7612 E+1	.1301 E+1	.2683 E+0	.6644 E-1	.2306 E-1	
	R=	.2224 E+1	.1176 E+1	.6867 E+0	.4205 E+0	.2899 E+0	
1.0	F=	.1420 E+2	.2428 E+1	.5007 E+0	.1240 E+0	.4303 E-1	
	R=	.4768 E+1	.2563 E+1	.1472 E+1	.9013 E+0	.6215 E+0	
2.0	F=	.2461 E+2	.4530 E+1	.9344 E+0	.2314 E+0	.8030 E-1	
	R=	.1022 E+2	.5474 E+1	.3155 E+1	.1932 E+1	.1332 E+1	
4.0	F=	.4946 E+2	.8454 E+1	.1744 E+1	.4317 E+0	.1498 E+0	
	R=	.2191 E+2	.1178 E+2	.6763 E+1	.4141 E+1	.2855 E+1	
6.0	F=	.6056 E+2	.1033 E+2	.2132 E+1	.5277 E+0	.1832 E+0	
	R=	.3080 E+2	.1565 E+2	.8645 E+1	.5294 E+1	.3650 E+1	
8.0	F=	.9230 E+2	.1570 E+2	.3254 E+1	.8056 E+0	.2796 E+0	
	R=	.3124 E+2	.2524 E+2	.1450 E+2	.8877 E+1	.6121 E+1	
10.0	F=	.1120 E+3	.1928 E+2	.3978 E+1	.9848 E+0	.3418 E+0	
	R=	.6003 E+2	.3227 E+2	.1853 E+2	.1135 E+2	.7824 E+1	
20.0	F=	.2105 E+3	.3598 E+2	.7422 E+1	.1838 E+1	.6378 E+0	
	R=	.1287 E+3	.6917 E+2	.3972 E+2	.2432 E+2	.1677 E+2	
40.0	F=	.3979 E+3	.6715 E+2	.1385 E+2	.3429 E+1	.1190 E+1	
	R=	.2758 E+3	.1483 E+3	.8514 E+2	.5214 E+2	.3595 E+2	
60.0	F=	.7332 E+3	.1253 E+3	.2585 E+2	.6399 E+1	.2221 E+1	
	R=	.5912 E+3	.3178 E+3	.1825 E+3	.1118 E+3	.7706 E+2	

K= 1

N= .95

	0.1352	0.2663	0.4080	0.5933	0.7920
0.5 F=	.1011 E+2	.1608 E+1	.3111 E+0	.7278 E-1	.2420 E-1
R=	.1675 E+1	.9675 E+0	.5923 E+0	.3838 E+0	.2762 E+0
1.0 F=	.1952 E+2	.3106 E+1	.6009 E+0	.1406 E+0	.4675 E-1
R=	.3469 E+1	.2003 E+1	.1226 E+1	.7947 E+0	.5720 E+0
2.0 F=	.3771 E+2	.6000 E+1	.1161 E+1	.2716 E+0	.9031 E-1
R=	.7533 E+1	.4146 E+1	.2539 E+1	.1645 E+1	.1184 E+1
4.0 F=	.7986 E+2	.1159 E+2	.2243 E+1	.5247 E+0	.1745 E+0
R=	.1487 E+2	.8588 E+1	.5258 E+1	.3407 E+1	.2452 E+1
8.0 F=	.9036 E+2	.1433 E+2	.2772 E+1	.6486 E+0	.2157 E+0
R=	.1683 E+2	.1086 E+2	.6646 E+1	.4307 E+1	.3099 E+1
16.0 F=	.1400 E+3	.2239 E+2	.4333 E+1	.1014 E+1	.3371 E+0
R=	.3339 E+2	.1776 E+2	.1089 E+2	.7054 E+1	.5077 E+1
32.0 F=	.1740 E+3	.2768 E+2	.5356 E+1	.1253 E+1	.4167 E+0
R=	.3892 E+2	.2248 E+2	.1376 E+2	.8917 E+1	.6418 E+1
64.0 F=	.3361 E+3	.5348 E+2	.1035 E+2	.2421 E+1	.8049 E+0
R=	.8039 E+2	.4654 E+2	.2849 E+2	.1846 E+2	.1329 E+2
128.0 F=	.6494 E+3	.1033 E+3	.1999 E+2	.4677 E+1	.1555 E+1
R=	.1659 E+3	.9636 E+2	.5899 E+2	.3823 E+2	.2751 E+2
256.0 F=	.1253 E+4	.1996 E+3	.3862 E+2	.9035 E+1	.3004 E+1
R=	.3453 E+3	.1995 E+3	.1221 E+3	.7915 E+2	.5697 E+2

K= 1,

N= 1

Y=0	0.1652	0.2663	0.4080	0.5950	0.7920
0.0 F=	.1341 E+2	.1986 E+1	.3605 E+0	.7971 E-1	.2539 E-1
R=	.1252 E+1	.7830 E+0	.5110 E+0	.3504 E+0	.2633 E+0
1.0 F=	.2683 E+2	.3973 E+1	.7210 E+0	.1594 E+0	.5078 E-1
R=	.2304 E+1	.1566 E+1	.1022 E+1	.7008 E+0	.5265 E+0
2.0 F=	.5365 E+2	.7946 E+1	.1442 E+1	.3188 E+0	.1016 E+0
R=	.3048 E+1	.3132 E+1	.2044 E+1	.1402 E+1	.1053 E+1
3.0 F=	.1073 E+3	.1589 E+2	.2884 E+1	.6377 E+0	.2031 E+0
R=	.1010 E+2	.6264 E+1	.4088 E+1	.2803 E+1	.2106 E+1
5.0 F=	.1341 E+3	.1986 E+2	.3605 E+1	.7971 E+0	.2539 E+0
R=	.1252 E+2	.7830 E+1	.5110 E+1	.3504 E+1	.2633 E+1
8.0 F=	.2146 E+3	.3178 E+2	.5768 E+1	.1275 E+1	.4062 E+0
R=	.2019 E+2	.1253 E+2	.8176 E+1	.5607 E+1	.4212 E+1
10.0 F=	.2683 E+3	.3973 E+2	.7210 E+1	.1594 E+1	.5078 E+0
R=	.2304 E+2	.1566 E+2	.1022 E+2	.7008 E+1	.5265 E+1
20.0 F=	.5365 E+3	.7946 E+2	.1442 E+2	.3188 E+1	.1016 E+1
R=	.3048 E+2	.3132 E+2	.2044 E+2	.1402 E+2	.1053 E+2
40.0 F=	.1073 E+4	.1589 E+3	.2884 E+2	.6377 E+1	.2031 E+1
R=	.1010 E+3	.6264 E+2	.4088 E+2	.2803 E+2	.2106 E+2
80.0 F=	.2146 E+4	.3178 E+3	.5768 E+2	.1275 E+2	.4062 E+1
R=	.2019 E+3	.1253 E+3	.8176 E+2	.5607 E+2	.4212 E+2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTARITA, G. and MARRUCCI, G. Principles of non-Newtonian fluids mechanics. McGraw-Hill, Inglaterra, 1974.
2. BIRD, R.B. *et alii*. Transport phenomena. Wiley Int. Edition, EUA, 1960.
3. BOWEN Jr., R.L. Designing laminar flow systems. Chemical Engineering 68: 243-248 (1961).
4. BRODKEY, R.B. The phenomena of fluid motions. Addison-Wesley USA (1967).
5. CASTAIGNE, F. *et alii*. Propriétés rhéologiques de solutions contenant des protéines de soya et l'alginat vue du filage de ces solutions. J. Inst. Cantechnol. Alim., 8 (3): 129-132, (1975).
6. CHRISTIANSEN, E.B. *et alii*. Pipeline design for non-Newtonian fluids in streamline flow. AIChE journal 1 (4): 544-548, (1955).
7. COURY, J.R. Contribuição ao estudo das propriedades reológicas de fluidos não-Newtonianos. Tese de Mestrado. USP São Paulo, (1979).
8. COLEMAN, B.D. *et alii*. Viscosimetric flows of non-Newtonian fluids. Springer-Verlag, Alemanha, 1966.
9. CRANE, C.O. (Catálogo). Chicago. (1978)
10. DOWNIE, N.M. y HEATH, R.W. Métodos estadísticos aplicados. Harper & Row Publishers Inc. México (1973).

11. HARPER, J.C. and ELSAHRIGI, A.F. Viscometric behavior of tomato concentrates. Journal Food Science, (30): 470 - 476 (1965).
12. HOLDSWORTH, S.D. Processing of non-Newtonian foods. Process Biochemistry, (4) 10: 15-21 (1969).
13. HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behavior of fluids food products. Journal of Texture Studies, (2): 393-418 (1971).
14. MIDDLEMAN, S. The flow of high polymers. Interscience Publishers, EUA, 1968.
15. MIZRAHI, S. and BERK, Z. Flow behavior of concentrated orange juice. Journal of Texture Studies, (1): 342-355 (1970).
16. PALOMINO, L.N.O. Comportamento reológico dos purês de banana, goiaba, manga e mamão à temperatura ambiente e teste do desempenho de um viscosímetro de tubos. Tese de Mestrado. UNICAMP. SP. (1973).
17. PERRY, R.H. e CHILTON, C.H. Manual de Engenharia Química. 5ª Edição. Editora Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro (1980).
18. RAO, M.A. Measurement of flow properties of fluid foods, developments, limitations and interpretation of phenomena. Journal of Texture Studies (8) 265-290 (1977).
19. SAKIADIS, B.C. Viscoelastic flow properties of polymeric

- materials - Piston Extrusion Rheometry. Chemische Techniek de Ingenieur, (48): 97-104 (1967).
20. SARAVACOS, G.D. Tube viscometry of fruit purees and juices. Food Technology, (22): 1585-1588, (1968).
21. SARAVACOS, G.D. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. Journal of Food Science, (35): 122-125, (1970).
22. SHAMES, I.H. Mechanics of fluids. McGraw-Hill, Japão, (1962).
23. SHERMAN, P. Industrial rheology. Academic Press. Londres (1970).
24. SKELLAND, A.H.P. Non-Newtonian flow and heat transfer. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1967.
25. SMITH, C.E. *et alii*. Evaluation of flowability of melted mozzarella cheese by capillary rheometry. Journal of Food Science, (45): 1142-1145, (1980).
26. STRATTON, R.A. Non-Newtonian flow in polymer systems with no entanglement coupling. Non-Newtonian flow in polymer systems, (3) 3:304-310 (1972).
27. VAN WAZER, J.R., LYONS, J.W., KIM, K.Y. e COIWELL, R.E. Viscosity and flow measurement. John Wiley & Sons, Inc. Londres, (1963).
28. VENNARD, J.K. Fluid mechanics 4^a edição. John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque, (1961).

29. WIRTW, H.G. *et alii*. Arcillas nontmorrillonitica - características de escurrimiento de suspensiones. Revista de Ingenieria Química 15 (15-23) e 16 (53-58), (1975).
30. WOHL, M.H. Instruments for fiscometry. Chemical Engineering 75: 151, (1968).