

28

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DOS PURÊS
DE BANANA, GOIABA, MANGA E MAMÃO
À TEMPERATURA AMBIENTE E TESTE DO
DESEMPENHO DE UM VISCOSÍMETRO
DE TUBOS

Leoncio Nisanor Otoyá Palomino
Engenheiro Químico - UNMSM-Perú

Orientador:

Dr. M. Anandha Rao

Professor da Faculdade de Tecno-
logia de Alimentos da UNICAMP

Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia de Alimentos da Uni-
versidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Mes-
tre em Ciências de Tecnologia de Alimentos.

AGRADECIMENTOS

Somos muito gratos à Organização dos Estados Ameri
canos, patrocinadora do Curso.

Ao Dr. André Tosello, Diretor da Faculdade de Tecnologia
de Alimentos e do Curso de Pos Graduação, por seu incenti
vo e facilidades brindadas ao autor.

Ao Professor M. Anandha Rao, nosso amigo e orientado
r deste trabalho.

Aos companheiros e colegas que, com sua ajuda moral
fizeram possível a realização deste trabalho.

À Universidade Nacional Mayor de San Marcos, nossa
"Alma Mater".

Dedicatória

A meus filhos:
Sergio Ladislao e
Rocio del Pilar

"O espírito egresso do
Caos tende à harmonia perfeita"
(de "Vagabundo Original" M. Gorki)

ÍNDICE

Página

RESUMO

SUMMARY

I.	INTRODUÇÃO.....	1
II.	FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS.....	2
III.	PRINCIPAIS ESTUDOS REOLÓGICOS EM PURÊS E SUCOS DE FRUTAS E VEGETAIS.....	8
IV.	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	12
V.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	16
VI.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	19
VII.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
VIII.	CONCLUSÕES.....	42

APENDICE A

TIPOS DE VISCOSÍMETROS.....	44
-----------------------------	----

APENDICE B.

CONSIDERAÇÕES NO DESENHO DO VISCOSÍMETRO TESTADO.....	47
--	----

APENDICE C.

EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO EM TUBOS.....	50
---	----

APENDICE D.

EQUAÇÕES REOLÓGICAS DE ESTADO.....	55
------------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	60
-------------------	----

R E S U M O

Foram estudadas as características reológicas dos purês de quatro frutas tropicais e as características do desempenho de um viscosímetro de tubos, cujo desenho era uma modificação daquele apresentado por Saravacos. As determinações experimentais em cada purê foram correlacionadas ao modelo da Lei da Potência, determinando-se os seus parâmetros característicos pelo método dos mínimos quadrados. Na verificação da validade da regressão linear foi empregado o Teste de Fisher, sendo que os raios de correlação indicaram 95% de probabilidade para os dados do purê de banana e 99% para os dados dos purês de goiaba, manga e mamão. Os parâmetros do comportamento do fluxo n foram menores que a unidade (banana 0,492, goiaba 0,475, manga 0,329 e mamão 0,480), indicando desta maneira que todos eles possuíam comportamento pseudoplástico. Os índices de consistência K' foram 40,91 no purê de banana, goiaba 47,98, manga 24,60 e 12,50 no caso do purê de mamão. No referente ao desempenho do viscosímetro, a análise das fontes de erro indicaram que elas possuíam influência desprezível nas determinações experimentais. A análise geral dos erros permitiu estimar que os dados experimentais eram reprodutíveis na faixa de $\pm 5\%$.

S U M M A R Y

The rheological behaviour of four tropical fruit purees, and the performance characteristics of a tube viscometer, which was a modified design of that used by Saravacos have been studied. The experimental data was found to be well correlated by the Power law model. The parameters of the Power law model were determined by the method of least squares. Employing Fisher's test for linear regression the probabilities were found to be: 95% for the data with banana puree and 99% for the data with purees of mango, guava and papaya. The flow behaviour index n was less than unity for all the purees (banana 0,492, guava 0,475, mango 0,392 and papaya 0,480), indicating pseudoplastic behaviour of all the purees tested. The respective magnitudes of the consistency index were -- 40,91, 47,98, 24,60 and 12,50. Error analysis on the performance of the viscosimeter indicated negligible influence of the experimental variables. An estimate of the total error indicates that the experimental data can be reproduced within an accuracy of $\pm 5\%$.

I. INTRODUÇÃO

A crescente procura de dados do comportamento reológico dos produtos vegetais, está ligada à grande importância econômica que adquiriram os concentrados, purês e sucos de frutas e vegetais, na moderna indústria alimentar. Isto trouxe consigo a necessidade de otimizar as linhas de produção. A otimização das linhas de produção, requer o conhecimento do comportamento reológico dos produtos a serem processados. Esta informação, permitirá então, predizer o escoamento nos canos, potência de bombeio, dados de mistura, velocidade de aquecimento na concentração, desidratação, pasteurização e esterilização, operações muito frequentes e de singular transcendência na tecnologia dos alimentos. Por outro lado, e sem ser menos importante, as propriedades reológicas são valiosas informações no controle de qualidade e nas avaliações das características sensoriais dos produtos. No campo da reologia dos produtos de frutas tropicais, a informação é escassa, embora comercialmente em nossos países tenha-se iniciado sua industrialização, ainda existem outras frutas cuja industrialização é potencialmente factível.

O objetivo deste trabalho, foi estudar o comportamento reológico a temperatura ambiente, de quatro purês de frutas tropicais (banana, goiaba, manga e mamão), empregando um viscosímetro de tubos, cujo desenho era uma modificação daquele usado por Saravacos (1968). A análise dos erros experimentais e o tratamento estatístico dos resultados indicaram a validade das determinações experimentais obtidas com o viscosímetro testado. Assim mesmo, apresentam-se as características reológicas dos purês testados, os diagramas de fluxo e de viscosidade.

II. FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

De modo geral, o termo não-Newtoniano designa os materiais nos quais, as relações tensão cisalhante - taxa de de formação não são constantes, podendo ser que além disso, também sejam funções do tempo e/ou das forças de recuperação elástica do material.

Classificação dos fluidos não-Newtonianos.

Da definição anterior, pode-se inferir que a classificação primária, deverá considerar, três grupos de fluidos não-Newtonianos perfeitamente diferenciados: (a) fluidos não-Newtonianos independentes do tempo, (b) fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo, e (c) fluidos não-Newtonianos que apresentam recuperação elástica. A classificação prévia é decorrente da definição do termo "não-Newtoniano", sem embargo, na literatura é possível encontrar outras, muitas delas arbitrárias, uma vez que a terminologia, ainda não tem sido padronizada (Metzner, 1956).

(a) Fluidos não-Newtonianos independentes do tempo.

i. Plástico Bingham ou Plástico Ideal. Este tipo de fluido apresenta um excesso de rigidez, o qual deve ser vencido para que o material possa fluir. Num diagrama de fluxo (tensão cisalhante contra taxa de deformação) como o da Figura 1, é caracterizado por uma linha reta cuja intersecção no eixo das tensões, corresponde ao valor da tensão limite τ_0 .

A explicação do comportamento do Plástico ideal, foi dada por Bingham 1922. Ele assumia que o fluido inicialmente em repouso, possui estrutura tri-dimensional suficientemente rígida para suportar tensões cisalhantes menores ou iguais a τ_0 . Quando excedida, ocorre a quebra total da estrutura e então o

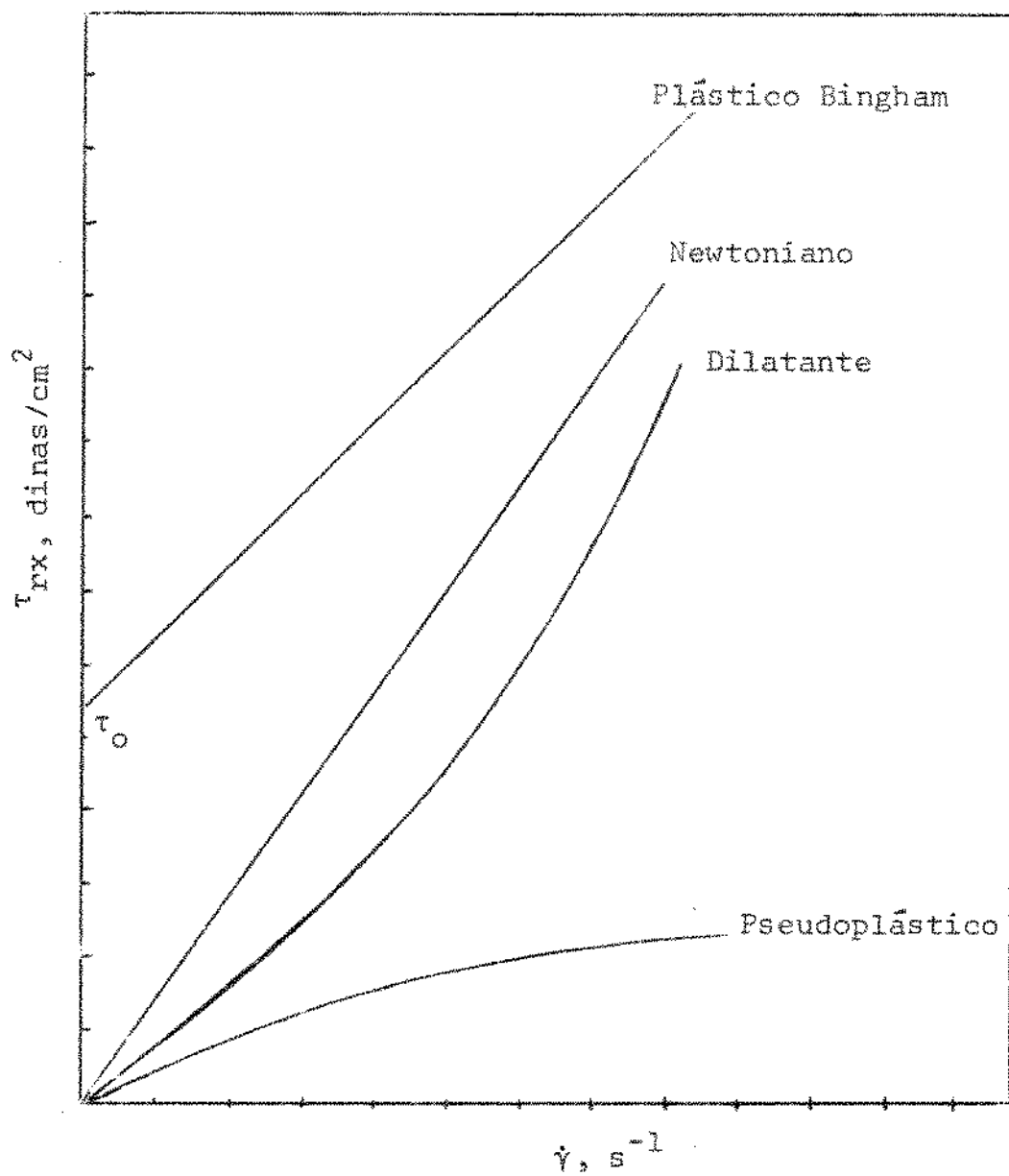


Figura 1 - Diagrama de Fluxo dos Fluidos independentes do tempo.

fluxo do fluido é realizado da mesma maneira que o fluxo Newtoniano, isto é, a deformação mantém-se proporcional à tensão cisalhante aplicada. Segundo Metzner (1956), poder-se-ia esperar que suspensões de partículas quase ou aproximadamente equidimensionais exibissem comportamento de Plástico Bingham, esperando-se que a grandeza de τ_0 dependesse do grau de aderência entre as partículas. Bird e col. (1960), consideram que o modelo é concorde com certas suspensões de combustíveis nucleares em água pesada, mas Metzner (1961), assinala que não existe na prática fluido real algum que observe comportamento de Plástico Bingham, e que tal modelo só tem interesse histórico.

ii. Fluidos Pseudoplásticos ou "Shear Thinning". A característica dos fluidos Pseudoplásticos é a diminuição da sua viscosidade com o incremento da tensão cisalhante. Williamson (1929) chamou a estes materiais, Pseudoplásticos, pelo fato de que as pequenas tensões cisalhantes, apresentam comportamento semelhante aos Plásticos Bingham. Segundo Brodkey (1967). Ostwald denominou-os "materiais com viscosidade estrutural" pelo fato de apresentarem comportamento Newtoniano tanto a baixas como a elevadas tensões de cisalhamento, sugerindo uma curva como a da Figura 2; mas num intervalo de tensões de cisalhamento muito amplo, a viscosidade diminui com o incremento da tensão cisalhante. Este último fato implica que sob essas condições o material seja mais fluido, pelo qual Brodkey (1967) emprega na designação destes materiais o termo "Shear Thinning".

É necessário indicar que o termo "viscosidade", perde valor nos fluidos não-Newtonianos, a menos que sejam especificadas a taxa de deformação ou a tensão cisalhante. Na terminologia técnica é frequente o uso dos seguintes termos:

Viscosidade diferencial, definida pela variação da tensão cisalhante em relação à variação da taxa de deformação, tomadas a intervalos pequenos.

Viscosidade aparente, definida pelo quociente entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação produzida a dita tensão.

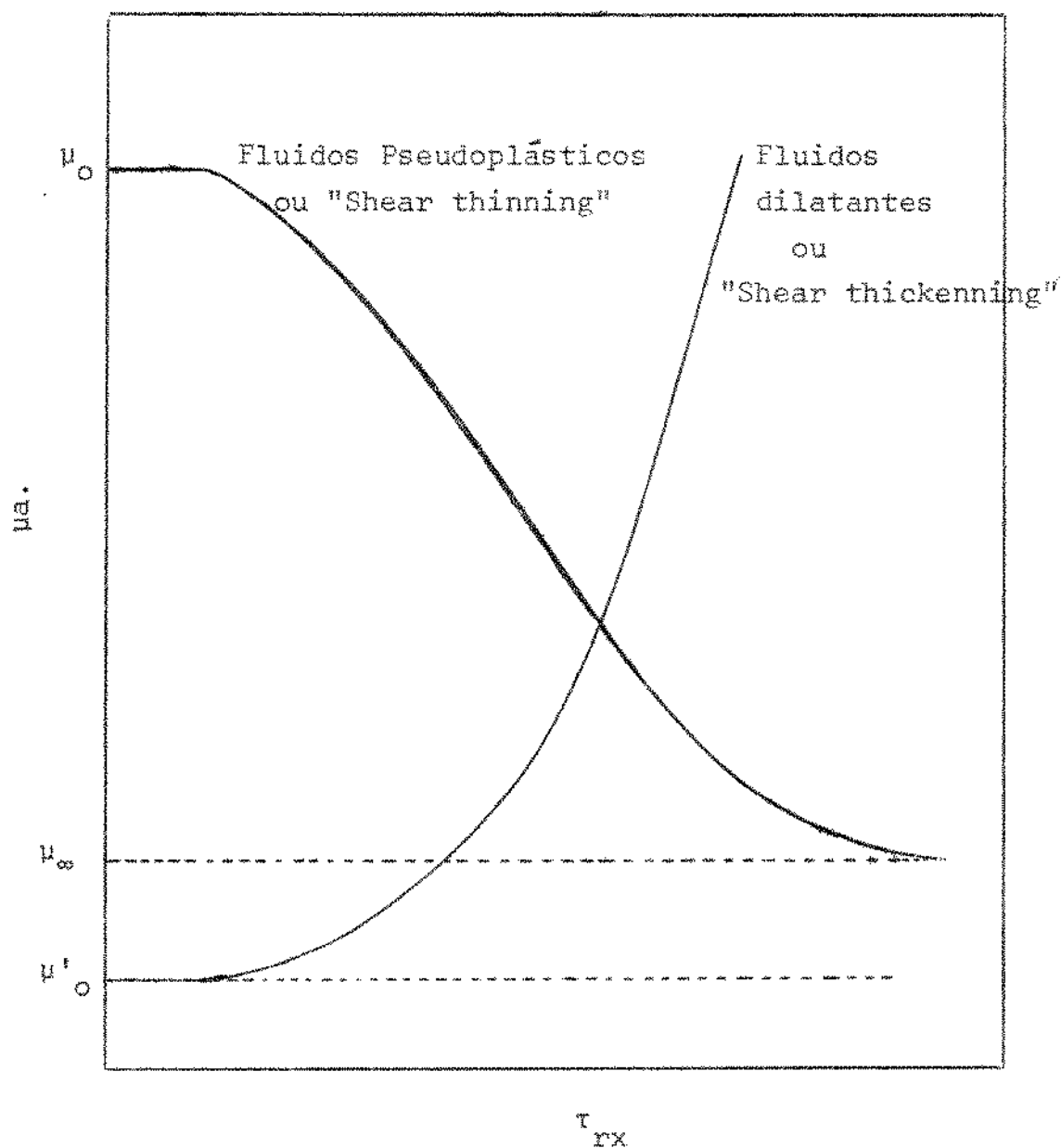


Figura 2 - Curvas de fluxo dos fluidos pseudoplásticos e dilatantes. (variações da viscosidade em relação à Tensão cisalhante).

No diagrama de fluxo, Figura 1, a curva dos flui dos Pseudoplásticos caracteriza-se por apresentar concavidade para baixo. A provável explicação do comportamento Pseudoplástico é dada por Metzner (1956), segundo o qual, as partículas no começo em desordem, são alinhadas pela ação da tensão cisalhante aplicada inicialmente, portanto, o alinhamento produzido tende a minimizar as interações das partículas, com a consequente dimi nuição da resistência ao fluxo. O recente trabalho de Cox e Brenner (1971), parece confirmar ou ao menos, é um fato em prol da hipótese esboçada por Metzner.

iii. Fluidos Dilatantes ou "Shear Thickening". Estes fluidos comportam-se de maneira totalmente oposta aos Pseudo plásticos, isto é, sua viscosidade incrementa com o aumento da tensão cisalhante. Brodkey (1967), chama-os "Shear Thickening" devido ao comportamento perante as tensões cisalhantes. Osborne Reynolds 1888, explicava este comportamento, assumindo que no re pouso, o fluido consistia de partículas densamente empacotadas, nas quais os espaços entre elas eram muito pequenos e cheios de líquido. A deformação inicial precisa de pequenas tensões, uma vez que o líquido entre as partículas atua como lubrificante, fa cilitando seu deslizamento. Maiores tensões causam a ruptura da estrutura, e nesta nova situação, não haverá suficiente quantidade de líquido para facilitar o deslizamento, sendo então, que deformações iguais requerirão maiores tensões cisalhantes. No diagrama de fluxo, Figura 1, a curva característica destes flui dos, apresenta concavidade para cima.

(b) Fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo.

Matz (1961), define-os como materiais nos quais a viscosidade aparente varia tanto com a tensão cisalhante como a duração dela. A classificação destes fluidos, apresenta dois grupos; o primeiro compreende os chamados Fluidos Tixotrópicos, nos que a viscosidade aparente diminui com o tempo de aplicação da tensão cisalhante. O segundo grupo compreende os chamados Fluidos Reopéticos, nos quais a viscosidade aumenta com o tempo

de aplicação da tensão cisalhante. O comportamento dos Fluidos não-Newtonianos dependentes do tempo segundo Metzner (1956), provavelmente tenha as mesmas causas do comportamento pseudoplástico e dilatante, sendo que a diferença poderia ser devida a que o alinhamento ou a ruptura das massas solvatadas em vez de serem produzidas em períodos de tempo indefinidos, o são quase instantaneamente, porém, cabe a possibilidade de que estas respostas sejam variáveis com relação ao tempo, em cujo caso os fatos, poder-se-iam associar tanto à reopexia como a tixotropia.

(c) Fluidos não-Newtonianos com recuperação Elástica

Os materiais assim considerados, caracterizam-se por possuir propriedades tanto dos sólidos quanto fluidos. Seu estudo é muito complexo e embora tenham sido pesquisados no campo da Tecnologia dos Polímeros, mesmo assim requerem de muitas teorias para explicar o seu comportamento. Na atualidade tem-se em voga duas teorias de Viscoelasticidade, mas os detalhes destas escapam aos fins deste trabalho.

III. PRINCIPAIS ESTUDOS REOLÓGICOS EM PURÊS E SUCOS

DE FRUTAS E VEGETAIS

Kerst e Lacontí (1944), estudaram a reologia de suco de tomate comercial, estabelecendo a influência da composição e da temperatura na consistência dos sucos. Davis e Col. (1954) quase simultaneamente com Luh e col. (1954), publicaram resultados das determinações da consistência de purês de tomate. Estes trabalhos foram realizados independentemente e não obstante em pregassem variedades diferentes de tomate, tanto os resultados como as conclusões às quais chegaram são concordantes. O trabalho de Wittenberger e Nutting (1957), veio a completar os trabalhos anteriores, pois estudava os efeitos da estrutura celular da polpa de tomate em relação ao comportamento reológico dos produtos comerciais, com especial interesse no suco de tomate. Os estudos posteriores ao de Wittenberger e Nutting, estabeleceram quantitativamente o comportamento das pastas, purês e sucos de tomate, assim como as determinações das variáveis envolvidas no seu processamento.

Smit e Nortje, (1958), Harper e El Sahrighi, (1965), Foda e Mc Collum, (1970) e Higgs e col. (1971), apresentaram estudos nos quais são expressadas as constantes do comportamento reológico dos produtos de tomate e a influência delas em relação à temperatura, composição e variedade. Todos eles concluíram que o índice de consistência do produto varia apreciavelmente com a composição, e de maneira menos marcante com a temperatura. Em relação ao índice de comportamento reológico, os estudos indicam ligeira dependência com a composição e quase nenhum em relação à temperatura. Em primeira aproximação, estes resultados vêm favorecer a hipótese de Metzner (1956), para a explicação do comportamento pseudoplástico, desde que os produtos estudados, das as características da polpa de tomate basicamente, podem ser assimiladas à "suspensão" da hipótese de Metzner.

Um outro trabalho que merece ser destacado, visto que apresenta dados em relação ao processamento, foi feito por Marsaioli Jr. (1965). Nele foram estabelecidas as constantes do comportamento reológico de pastas de tomate a diferentes concentrações a suas temperaturas de evaporação.

Charm (1960) e (1963), estudou o comportamento reológico de purê de banana. Empregando um viscosímetro de tubos à temperatura de 24°C, determinou comportamento pseudoplástico tanto no purê da variedade Brand A como no da variedade Brand B. A variedade Brand A possuía os seguintes índices, $n = 0,33$ e $K = 107$ entretanto a variedade Brand B apresentava $n = 0,458$ e $K = 65$. Previamente, Charm e Merrill (1959), tinham estudado o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento reológico de purês de banana, na faixa de 22-50°C, estabelecendo valores que oscilavam entre 0,46 e 0,486.

Saravacos (1968), estudou purê de pera com 14,6% de conteúdo de sólidos à temperatura de 27°C, empregando um viscosímetro de tubos. Determinou pseudoplasticidade baseado nos índices $n = 0,38$ e $k = 53$. O mesmo autor empregando viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos, determinou que o índice de comportamento para um purê de 16° Brix testado na faixa de 20-70°C, era 0,30: Holdsworth (1971), apresentou dados de Harper e Labermann para purês de pera cuja concentração de sólidos era de 18,3 e 45,75 e à temperatura na faixa de 32-82°C. Determinaram comportamento pseudoplástico, as constantes variam desde 0,45 até 0,486 e os índices de consistência entre 355 e 14,5. Estes resultados mostram a mínima influência da temperatura no valor do índice de comportamento reológico, porém que o índice de consistência varia apreciavelmente com ela. Em relação ao conteúdo de sólidos no purê, sua influência é pequena em relação ao índice de comportamento reológico e ligeiramente no índice de consistência.

Saravaços (1970), determinou o comportamento pseudo plástico dos sucos de laranja na faixa de temperatura de 22 até 70°C. As determinações foram feitas num viscosímetro rotacional. Os resultados mostram que o índice de comportamento não varia com a temperatura e o efeito do conteúdo de sólidos é mínimo, uma vez que para as amostras testadas de 30° Brix o valor de "n" foi 0,85 e para a amostra de 44° Brix "n" era 0,65, independente das temperaturas de trabalho. Charm (1960), estabeleceu pseudoplasticidade para um concentrado de laranja à temperatura de 15°C, as constantes foram: $n = 0,584$ e $K = 11,9$. O mesmo autor publicou em 1962, as constantes reológicas de concentrado de laranja à temperatura de 0°C, indicando $n = 0,542$ e $K = 18,0$. Outro dado para concentrado de laranja é reportado por Charm (1963), a 0°C, ele indica $n = 0,68$ e $K = 18,9$. O viscosímetro empregado por Charm nestas determinações foi um Brookfield LV. Mizarki e Berk (1970), testando sucos de laranja de 60 e 65° Brix a 30°C, determinaram valores de "n" 0,73 e 0,95, e valores de $k = 5,3$ e $2,6$ respectivamente. O comportamento dos sucos de laranja filtrados foi estudado por Saravacos (1970), determinando comportamento Newtoniano, mas indica que os resultados deviam ser tomados com reserva, uma vez que as medições apresentavam interferências como resultado da sedimentação das partículas suspensas. Um fato contraditório aos anteriores foi apresentado por Ezell (1959), desde que ele indica tixotropia nos concentrados de laranja.

Saravacos (1970), publicou dados do comportamento pseudoplástico de suco de uva de 64° Brix à temperatura de 30°C. Foi observado que o índice de comportamento reológico era de 0,90. Por outro lado, no mesmo trabalho se estabeleceu que a concentração abaixo de 50° Brix, os sucos de uva apresentavam comportamento Newtoniano.

Saravacos (1968), estabeleceu $n = 0,28$ e $k = 127$ para as constantes características do comportamento reológico de molho de maçã a 27°C. A determinação foi feita num viscosímetro de tubos e um conteúdo de sólidos de 11,6%. O mesmo autor, em posterior trabalho (1970), publicou para sucos de maçã de 65,5° Brix, $n = 0,65$, e para 50° Brix, $n = 0,85$. Mas para conteúdo de sólidos abaixo de 40° Brix, o comportamento era Newtoniano. Harper (1962), trabalhando com sucos de maçã despectinizados até de 75° Brix, determinou comportamento Newtoniano, sugerindo que esta substância era causante do comportamento não-Newtoniano dos sucos e concentrados de maçã.

No campo da reologia das frutas tropicais, o recente relatório anual do ICAITI (1972), apresenta dados das características reológicas dos purês de banana, manga, goiaba e mamão. Foi determinado comportamento pseudoplástico em todos os purês. O purê de "banana criollo" de 26,5° Brix a 40°C, apresentava $n = 0,34$ e $k = 85,75$. O purê de banana Valery, de 25° Brix, possuía $n = 0,39$ e $k = 58,91$. No purê de goiaba de 14,8° Brix, foi estabelecido $n = 0,38$ e $k = 111,17$. Para o purê de manga variedade "Amatillo" de 23° Brix, determinou-se $n = 0,26$ e $k = 107,65$. Na variedade "Mamey" o purê de manga de 24,8° Brix, apresentava $n = 0,28$ e $k = 276,02$. E finalmente o purê de mamão de 12,6° Brix, $n = 0,23$ e $k = 53,25$. Todas as determinações foram feitas à temperatura de 40°C num viscosímetro rotacional.

IV. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Purês das Frutas

Foram empregados nas determinações, quatro purês. O purê de mamão (7,39 Brix), tinha sido preparado em um desintegrador Rietz, utilizando-se polpa de mamão da variedade amarela. O mamão foi descascado e limpo das sementes manualmente com facas de aço inoxidável. A polpa desintegrada foi recirculada por três vezes para se obter maior concentração de sólidos. Ao purê obtido, foi-lhe adicionado metabisulfito de sódio na proporção de 3000 ppm, logo após envasilhado em recipiente de plástico, sendo testado quatro dias após. Os purês de banana, manga e goiaba, foram fornecidos pelo ITAL, e tinham sido processados em linha asséptica. O purê de banana com teor de sólidos de 17,79 Brix, tinha sido pasteurizado a 100°C, enlatado e estocado a 5°C durante nove meses antes de ser testado. A banana empregada na preparação do purê foi da variedade nanica. O purê de goiaba da variedade vermelha, tinha um teor de sólidos de 10,39 Brix, foi pasteurizado a 110°C, resfriado até 5°C, preservado com metabisulfito de sódio na proporção de 3000 ppm, envasilhado em recipientes de plástico com tampa roscada e estocados à temperatura ambiente durante nove meses antes de ser testado. O purê de manga da variedade espada, possuía um teor de sólidos de 9,39 Brix, tinha sido pasteurizado a 94°C, resfriado até 2°C, acondicionado em sacos de polietileno, estocado em câmara de congelamento a -30°C durante nove meses. Quando foi testado, previamente tinha sido descongelado com água a 100°C e adicionado 3000 ppm de metabisulfito de sódio para evitar a possibilidade de contaminação ou decomposição. A tabela 1 sumariza as características dos purês testados.

Tabela 1

Características dos purês das frutas testadas

<u>Fruta</u>	<u>Variedade</u>	<u>%Brix</u>	<u>Densidade</u> ^(a)
Banana	Nanica	17,7	1,019
Goiaba	Vermelha	10,3	1,065
Manga	Espada	9,3	1,035
Mamão	Amarela	7,3	1,023

(a) Determinada à temperatura de trabalho.

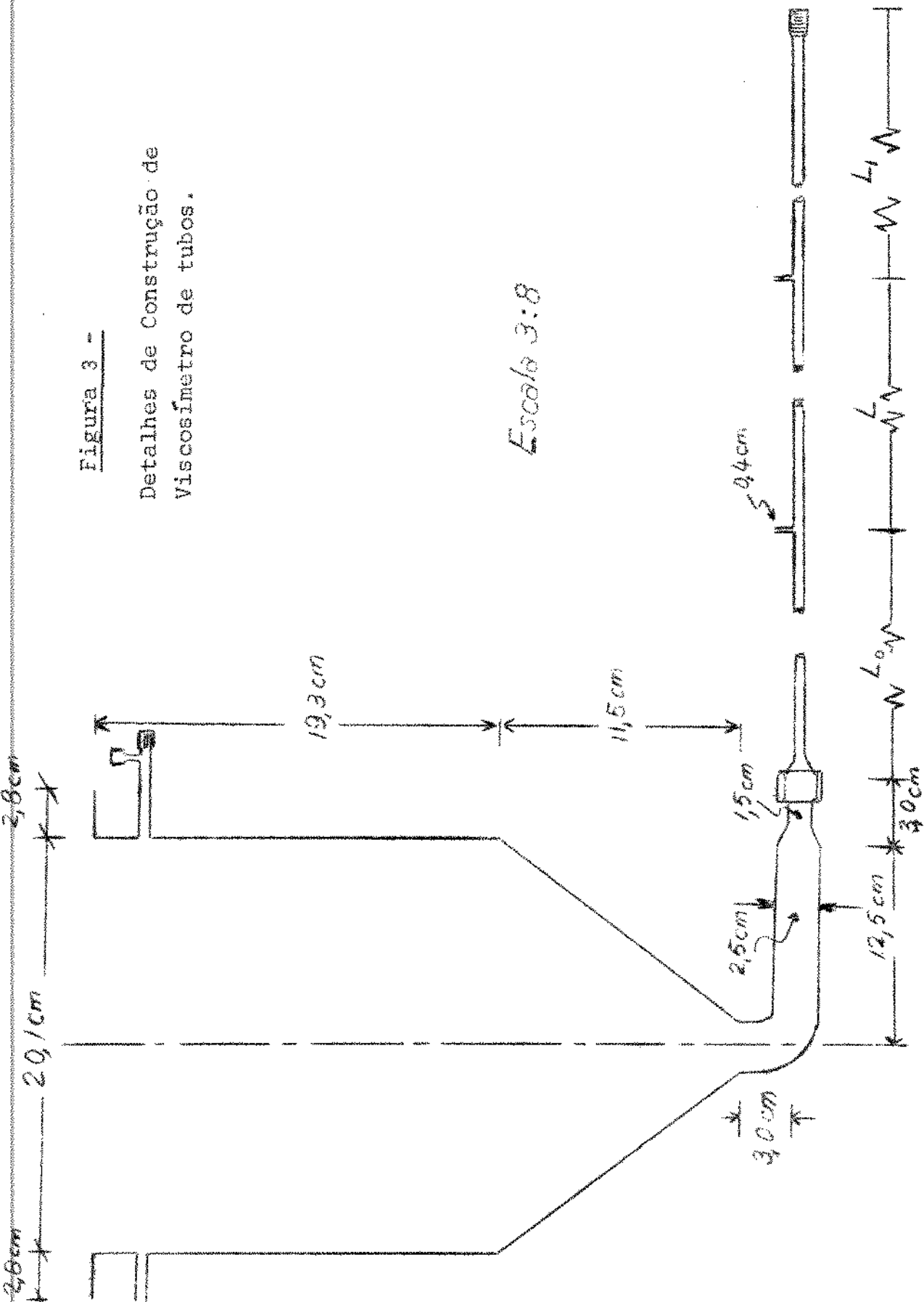
Equipamentos

Viscosímetro de tubos. Este viscosímetro, mostrado na Figura 4, era uma modificação do desenho original apresentado por Saravacos (1968), foi construído nas oficinas de Righetto e Cia, Campinas S.P. As modificações introduzidas visavam a minimização das fontes de erro do desenho original, as mesmas que são discutidas no Apêndice B. O viscosímetro consistia de um recipiente cilindro-cônico de 7,5 litros de capacidade e um jogo de três tubos, cujos diâmetros nominais eram 1/4, 3/8 e 1/2 polegadas respectivamente. Tanto o recipiente como os tubos eram de aço comercial inoxidável. O Apêndice B, apresenta detalhes do desenho testado. Os acessórios do viscosímetro eram: (a) cilindro de nitrogênio com válvula de regulação de pressão e mangueira de alta pressão, fornecido pela White-Martins Co., S.P., Brasil.

Figura 3 -

Detalhes de Construção de
Viscosímetro de tubos.

Escala 3:8



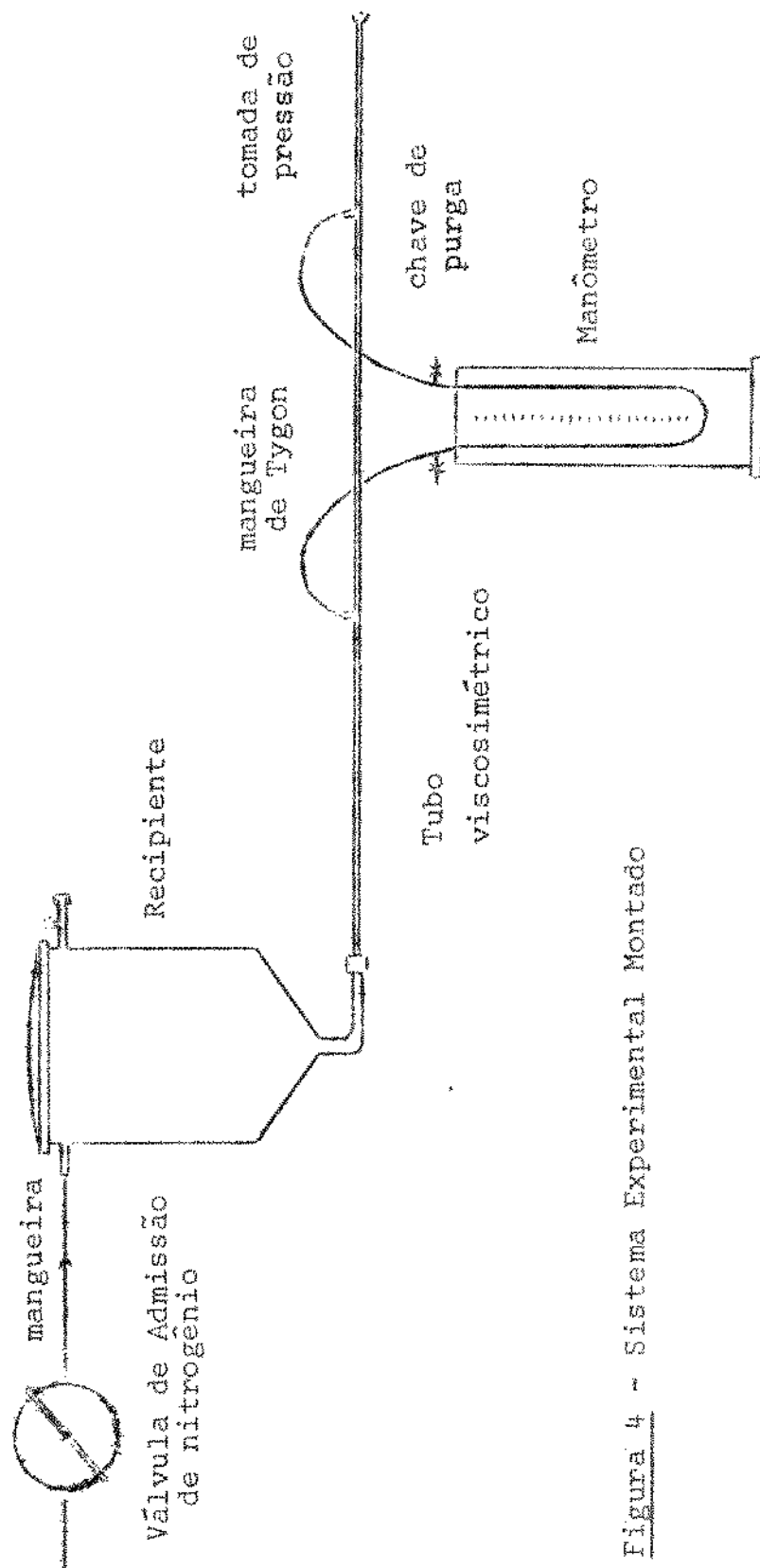


Figura 4 - Sistema Experimental Montado

(b) sistema de medição das quedas de pressão na linha, constitui da de um manômetro em U, feito de dois tubos de vidro de 9 mm. de diâmetro interno, unidos por uma mangueira de Tygon. O fluido manométrico era mercúrio próprio para análises, fornecido pela "Casa da Química S.A." de S.P., e (c) balança marca Mart, modelo 1000 de 1610 g. de capacidade cuja precisão era de 0,1 g, e um cronômetro marca Hanhart DBGM 7016-145 de 0,2 s de precisão, utilizados nas determinações da taxa de escoamento.

Outros aparelhos utilizados nas determinações complementares foram:

- Balança de precisão para análises, marca Mettler -H, de 160 g de capacidade e 0,0001 g de precisão, empregada nas determinações da densidade dos purês.

- Refratômetro Metronex da Polskie Optyczne cuja precisão era de 0,2 °Brix, empregado nas determinações do conteúdo de sólidos.

V. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O sistema montado segundo o esquema da Figura 3, com o recipiente contendo amostra até 4/5 da sua capacidade, foi manipulado da seguinte maneira:

1. Admissão de nitrogênio. Abertura da válvula de regulação até ser atingida a pressão desejada. Neste trabalho, a pressão observada máxima foi de 1.0 kg/cm².

2. Preenchimento dos ramos do manômetro de vidro, e degasificação da linha. Sugere-se o emprego do procedimento descrito mais adiante.

3. Verificação do escoamento em regime permanente, controlando a diferença de pressão indicada pelo manômetro de vidro, mantendo-a constante. Anotação deste valor.

4. Recolher volumes arbitrários em tempos pré-fixados

dos. Pesagem e anotação das quantidades.

5. Desmontagem do aparelho, lavagem com detergente

No caso de mudança da amostra, o mercurio manométrico deve-se lavar com água, logo após filtragem por duas vezes empregando papel de filtro e finalmente filtragem a vácuo para se tirar a umidade. Então volta ao estágio inicial seguindo novamente o roteiro descrito.

Levando em conta que os materiais testados possuíam elevadas viscosidades e que pela sua consistência, a difusividade do ar neles, é muito baixa; o preenchimento dos ramos do manômetro devia ser feito de modo tal que se evitasse a possibilidade de um mal contato entre o purê e o mercurio manométrico e por outro lado evitar a presença de bolhas de ar nos tubos do manômetro, caso contrário, os valores da tensão cisalhante calculadas pelas medidas da queda de pressão seriam errôneas. O seguinte procedimento foi empregado, desde que permitia evitar os problemas antes mencionados.

(a) Numa das tomadas de pressão, conectou-se mangueira de Tygon de diâmetro menor que o diâmetro do tubo do manômetro. O outro extremo da mangueira foi introduzida no tubo manométrico.

(b) A outra tomada de pressão assim como a descarga do tubo viscosimétrico foram fechadas.

(c) Admitiu-se nitrogênio à linha para forçar o escoamento do purê e o preenchimento total do ramo. Repetir a operação com o outro ramo.

(d) Conectou-se o manômetro com as tomadas de pressão da linha e forçou-se escoamento de purê. Nestas condições procedeu-se a degasificação da seção compreendida entre as tomadas de pressão e os extremos do tubo do manômetro, deixando escoar ao exterior uma pequena quantidade de purê através das chaves de purga.

Outras medições experimentais

(a) As determinações dos diâmetros dos tubos do viscosímetro, foram feitas indiretamente. Dispunha-se de amostras de 30,0 cm de comprimento de cada tubo. Estes foram enchidos de mercúrio, o mercúrio foi pesado e com este valor obteve-se o volume equivalente do cilindro reto de 30,0 cm de altura. Calculou-se então o diâmetro interno do tubo.

(b) As densidades dos purês foram determinadas por picnometria. Fizeram-se quatro determinações para cada purê e obteve-se a média geométrica como valor mais representativo da densidade de cada amostra.

VI. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Tabela 2

Valores dos parâmetros reológicos dos purês
testados, às temperaturas de trabalho

<u>Fruta</u>	<u>Variedade</u>	<u>°Brix</u>	<u>Temp. °C</u>	<u>n</u>	<u>K' dinas</u> <u>cm² sⁿ</u>
Banana	Nanica	17,7	22 ± 1	0,492	40,91
Goiaba	Vermelha	10,3	23,4 ± 1	0,475	47,98
Manga	Espada	9,3	24,2 ± 1	0,329	24,60
Mamão	Amarela	7,3	26 ± 1	0,480	12,50

Tabela 3

Dados experimentais e valores calculados* do teste com purê de Banana(17,39Brix)

à temperatura de 22,0 ± 1,0°C						
Prova nº	Δh mm	Q cc/s	$32Q/\pi d_o^3; s^{-1}$	$\frac{d_o}{4} \frac{\Delta p}{L}; \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$	$\dot{\gamma} s^{-1}$	μa poises
1	45	0,14	15,44	98,73	19,40	5,10
2	118	0,26	26,68	258,92	33,60	7,70
3	270	2,39	263,64	592,38	331,70	1,79
4	290	2,73	267,81	636,26	336,90	1,90
5	253	9,81	86,59	549,26	117,70	4,92
6	220	5,25	99,86	477,62	125,61	3,82
7	183	2,39	67,71	397,29	85,20	4,68
8	177	2,73	66,0	384,27	83,00	4,62

* Nas provas, 1,2,3 e 4 foi empregado tubo de 0,454 cm e nas provas 5,6,7 e 8 se empregou tubo de 0,812 cm de diâmetro interno.

Tabela 4

Dados experimentais e valores calculados* do teste com purê de Goiaba(10,39Brix)

Prova nº	Δh mm	Q cc/s	$32Q/\pi d_o^3; s^{-1}$	a temperatura de 23,4 + 1,0 °C		$\dot{\gamma} s^{-1}$	μa poises
				$\frac{d_o}{4} \frac{\Delta p}{AL}; \frac{dinas}{cm^2}$	$\frac{d_o}{4} \frac{\Delta p}{AL}; \frac{dinas}{cm^2}$		
1	90	0,76	14,46	194,89	194,89	18,66	10,40
2	90	0,68	12,94	194,89	194,89	16,70	11,91
3	90	1,49	28,35	194,89	194,89	36,44	5,42
4	90	1,45	27,59	194,89	194,89	35,59	5,06
5	105	1,69	32,15	227,50	227,50	41,47	5,06
6	105	1,61	30,63	227,50	227,50	39,64	5,82
7	165	3,57	67,92	357,29	357,29	87,62	4,14
8	165	3,00	57,08	357,29	357,29	73,53	4,93
9	167	3,68	70,01	361,64	361,64	90,31	4,04
10	167	4,02	76,48	361,64	361,64	98,66	3,71
11	218	6,62	125,95	472,08	472,08	162,48	2,98
12	218	6,21	118,15	472,08	472,08	152,56	3,16
13	253	5,73	109,01	547,95	547,95	139,00	3,96
14	338	21,31	405,42	829,38	829,38	523,00	1,61

* O diâmetro do tubo empregado foi 0,812.

Tabela 5

Dados experimentais e valores calculados* do teste com purê de Manga(9,39Brix)

à temperatura de 24,2 ± 0,2 °C						
Prova nº	Δh mm	Q cc/s	$32Q/\pi d_o^3 s^{-1}$	$\frac{d_o \Delta p}{4 L} ; \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$	$\dot{\gamma} s^{-1}$	μa
1	27	0,84	15,98	58,49	24,00	2,42
2	27	0,92	17,59	58,49	26,58	2,20
3	32	2,34	44,52	69,32	67,00	1,03
4	32	2,83	53,76	69,32	80,11	0,85
5	50	3,80	70,33	108,32	106,02	1,02
6	50	4,73	80,43	108,32	121,20	0,90
7	60	4,95	94,15	129,98	141,93	0,91
8	60	4,40	83,66	129,98	126,20	1,02
9	71	15,09	287,02	153,81	432,12	0,34
10	71	13,17	250,60	153,81	376,84	0,41
11	71	12,53	232,20	153,81	349,71	0,44
12	71	12,20	227,78	153,81	344,03	0,45
13	71	12,84	244,28	153,81	368,81	0,42
14	86	20,80	396,60	186,31	596,50	0,31
15	86	22,96	458,45	186,31	690,24	0,27
16	110	48,20	980,60	238,30	1.478,12	0,16

* O diâmetro do tubo empregado foi 0,812 cm.

Tabela 6

Dados experimentais e valores calculados* do teste de purê de Mamão (7,39Brix), a

temperatura de 26,0 + 1,0°C

Prova nº	Δh mm	Q cc/s	$32Q/\pi d_o^3 \text{ s}^{-1}$	$\frac{d_o}{4} \frac{\Delta p}{L} \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$	$\dot{\gamma} \text{ s}^{-1}$	$\mu \text{ poises}$
1	23	1,06	20,19	49,83	25,64	1,94
2	23	1,00	19,54	49,83	24,82	2,00
3	30	1,41	26,84	65,12	34,10	1,91
4	30	1,70	33,43	65,12	42,46	1,53
5	57	4,91	93,24	123,70	118,41	1,04
6	57	6,42	121,78	123,70	154,66	0,80
7	57	4,60	87,53	123,70	111,16	0,90
8	62	7,20	137,00	134,71	173,99	0,71
9	62	7,81	148,43	134,71	188,50	0,63
10	70	10,01	190,31	152,00	241,66	0,80
11	70	9,72	148,61	152,00	234,42	0,65
12	86	13,01	247,39	186,71	314,16	0,59
13	86	12,60	239,76	186,71	304,49	0,61
14	90	14,12	268,31	195,40	340,75	0,57
15	90	13,90	264,50	195,40	335,92	0,58
16	93	15,70	298,75	202,40	378,76	0,53
17	93	15,20	298,24	202,40	378,76	0,53
18	105	17,70	336,81	228,83	427,75	0,53
19	105	18,30	357,74	228,83	454,33	0,50
20	123	21,10	401,51	267,52	509,97	0,52
21	123	25,41	483,36	267,52	613,87	0,44

* O diâmetro do tubo empregado foi 0,812 cm.

Exemplo de Cálculo

Prova nº 15 do teste do purê de manga:

Dados experimentais

$\Delta h = 86 \text{ mm.}$

peso de purê escoado/30 s = 712,2 gr.

Calculações:

Queda de pressão:

$$\Delta p = (\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{purê}}) g \Delta h$$

$$\Delta p = (13,6 - 1,034) \frac{\text{gr}}{\text{cc}} \times 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \times 8,6 \text{ cm}$$

$$\Delta p = 1,06 \times 10^5 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$$

Valor da tensão cisalhante: (τ_{rx})

$$\frac{d_o}{4} \times \frac{\Delta p}{L} = \frac{0,812}{4} \times \frac{1,06 \times 10^6}{115} \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$$

$$\frac{d_o}{4} \times \frac{\Delta p}{L} = 186,31 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$$

Valor da pseudo taxa de deformação ($\dot{\gamma}_{ps}$)

Valor de Q:

$$Q = \frac{712,2 \text{ gr}}{305 \times 1,034 \text{ gr/cc}}$$

$$Q = 22,96 \text{ cc/s}$$

$$\frac{32 Q}{\pi d_o^3} = \frac{32 \times 22,96 \text{ cc/s}}{3,14 \times (0,812 \text{ cm})^3}$$

$$\frac{32 Q}{\pi d_o^3} = 458,45 \text{ s}^{-1}$$

Valor da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$)

Uma vez que o índice n determinado com os dados experimentais foi 0,329.

$$\left(\frac{3n + 1}{4n}\right) \left(\frac{32 Q}{\pi d_o^3}\right) = \left(\frac{3 \times 0,329 + 1}{4 \times 0,329}\right) 458,45 \text{ s}^{-1}$$

$$\left(\frac{3n + 1}{4n}\right) \left(\frac{32 Q}{\pi d_o^3}\right) = \dot{\gamma} = 690,20 \text{ s}^{-1}$$

Valor da viscosidade aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_{rx}}{\dot{\gamma}} = \frac{186,31}{690,20} = \frac{\text{dinas/cm}^2}{\text{s}^{-1}}$$

$$\mu_a = 0,27 \text{ poises}$$

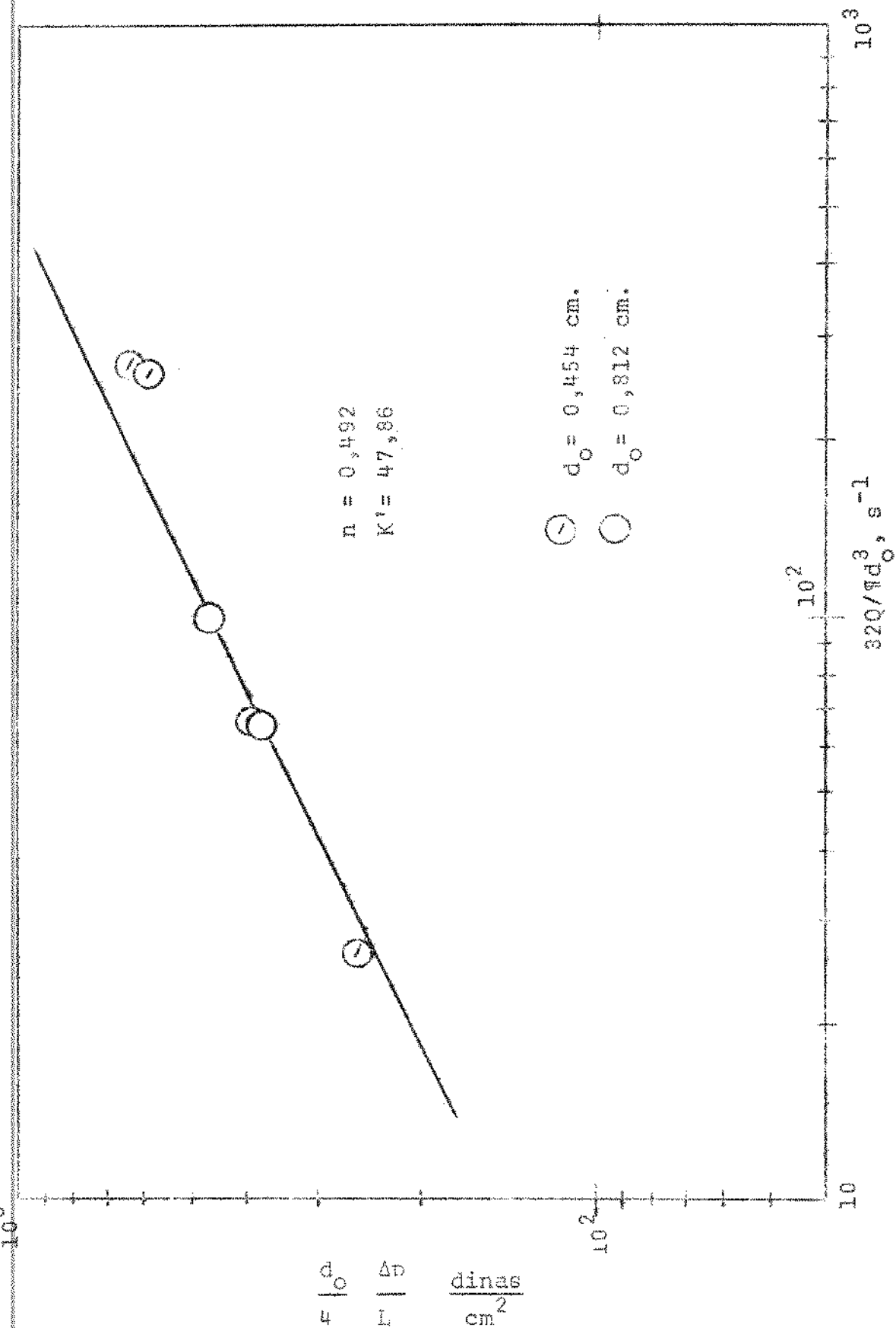


Figura 5 - Diagrama Capilar do purê de banana, ($t = 22 \pm 1^\circ\text{C}$).

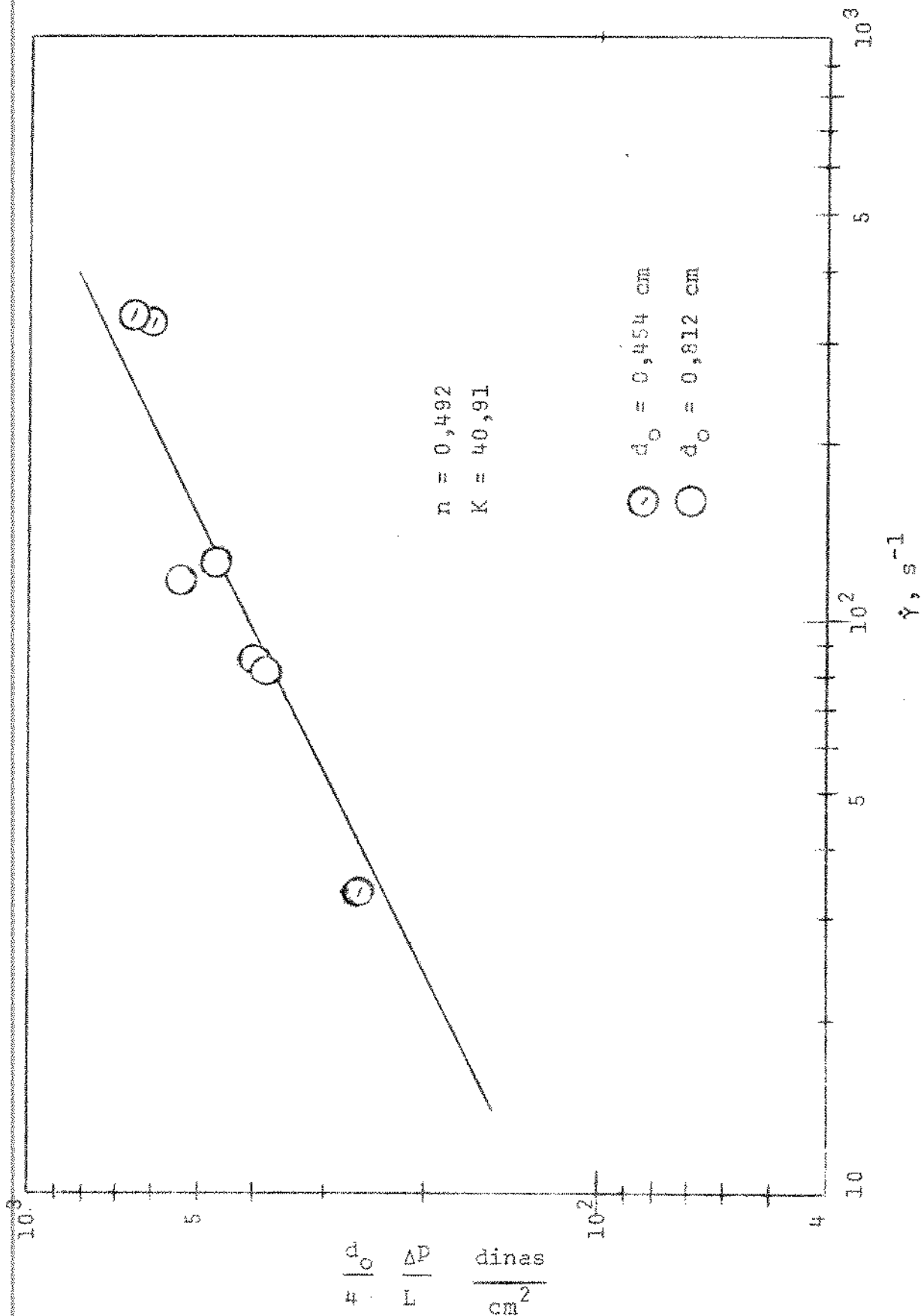


Figura 6 - Diagrama Básico do purê de Banana, ($t = 22 \pm 1^\circ\text{C}$)

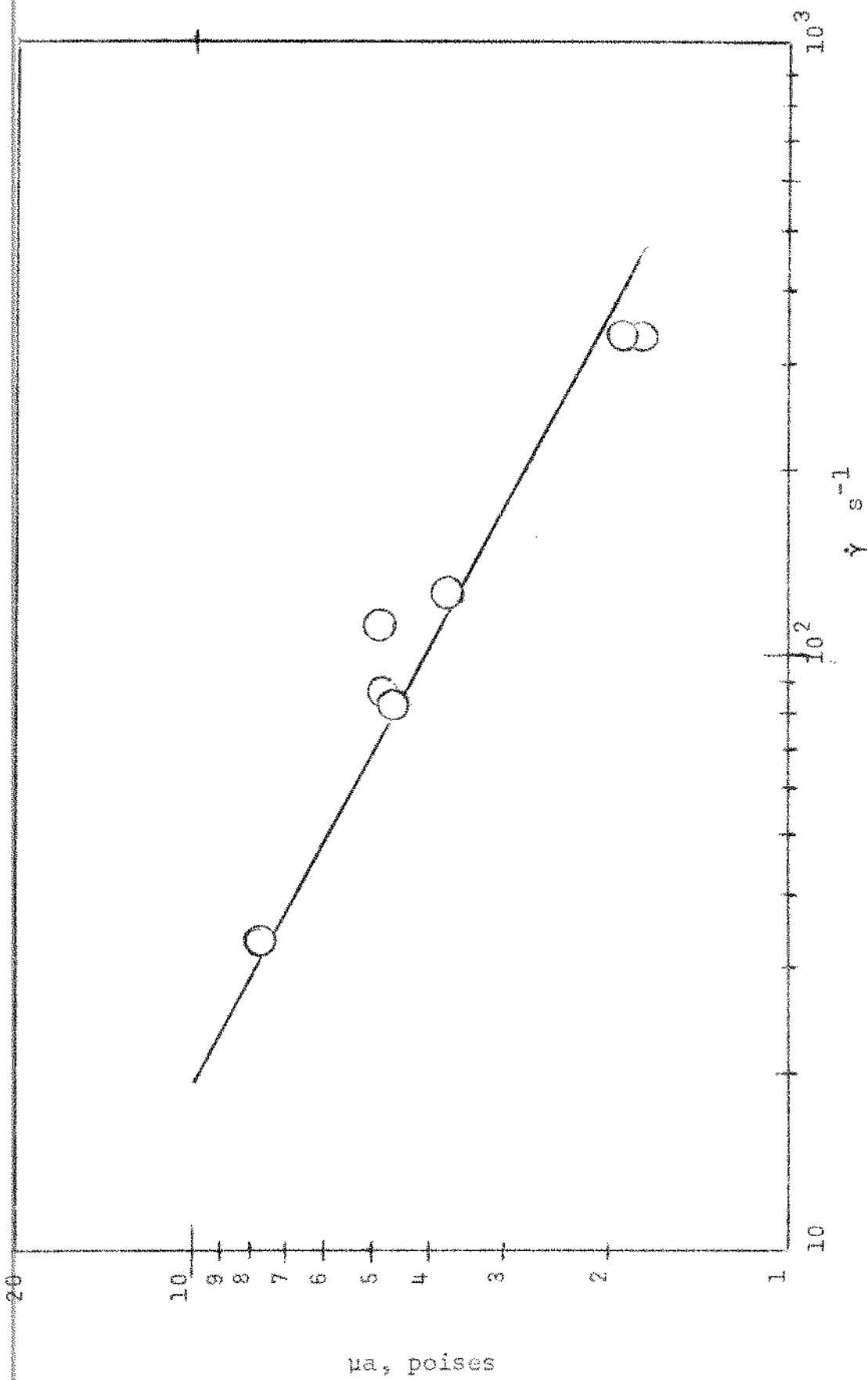


Figura 7 - Viscosidade do purê de banana, ($t = 22 \pm 1^\circ\text{C}$).

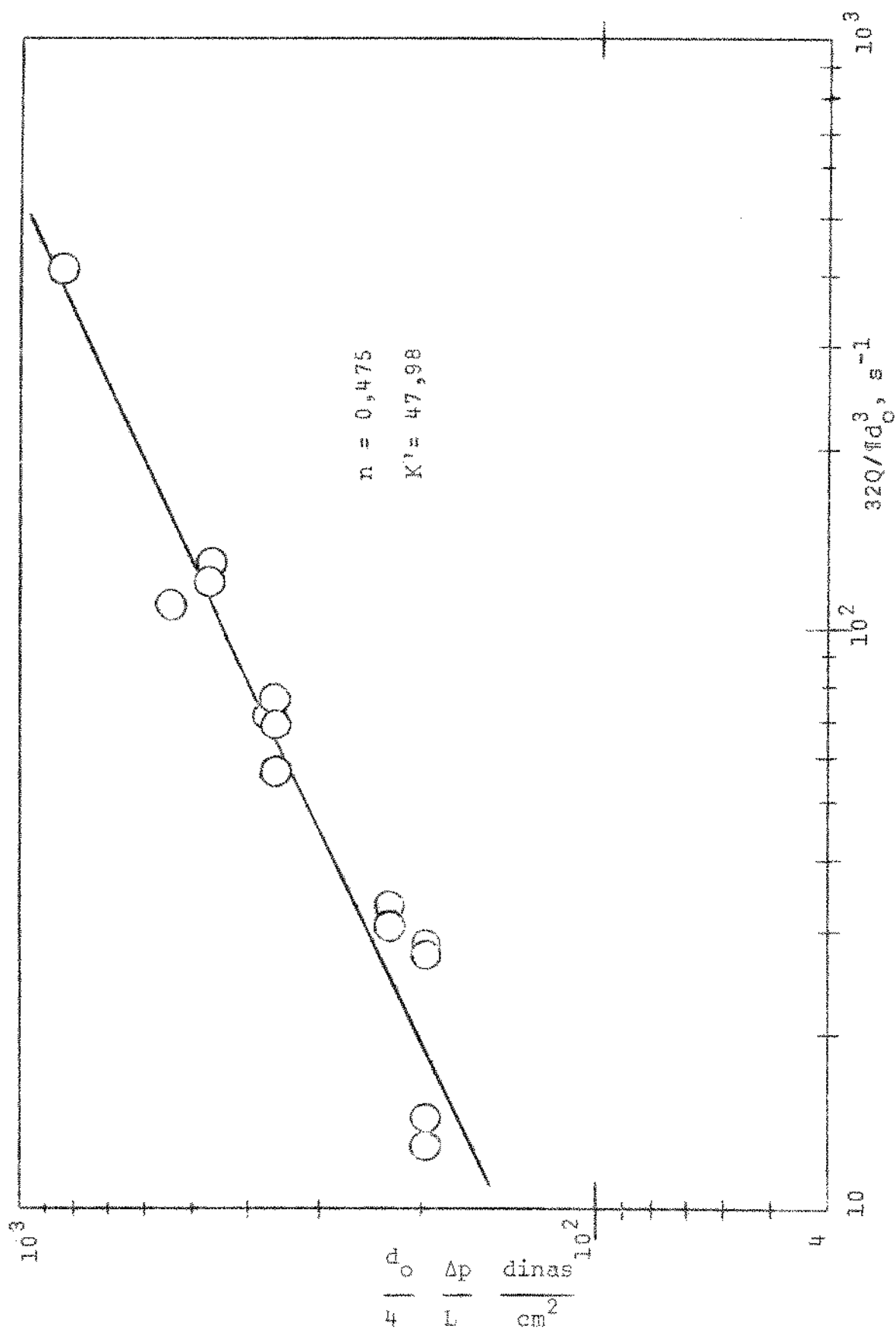


Figura 2 - Diagrama Capilar do purê de goiaba, ($t = 23,4 \pm 1^\circ\text{C}$)

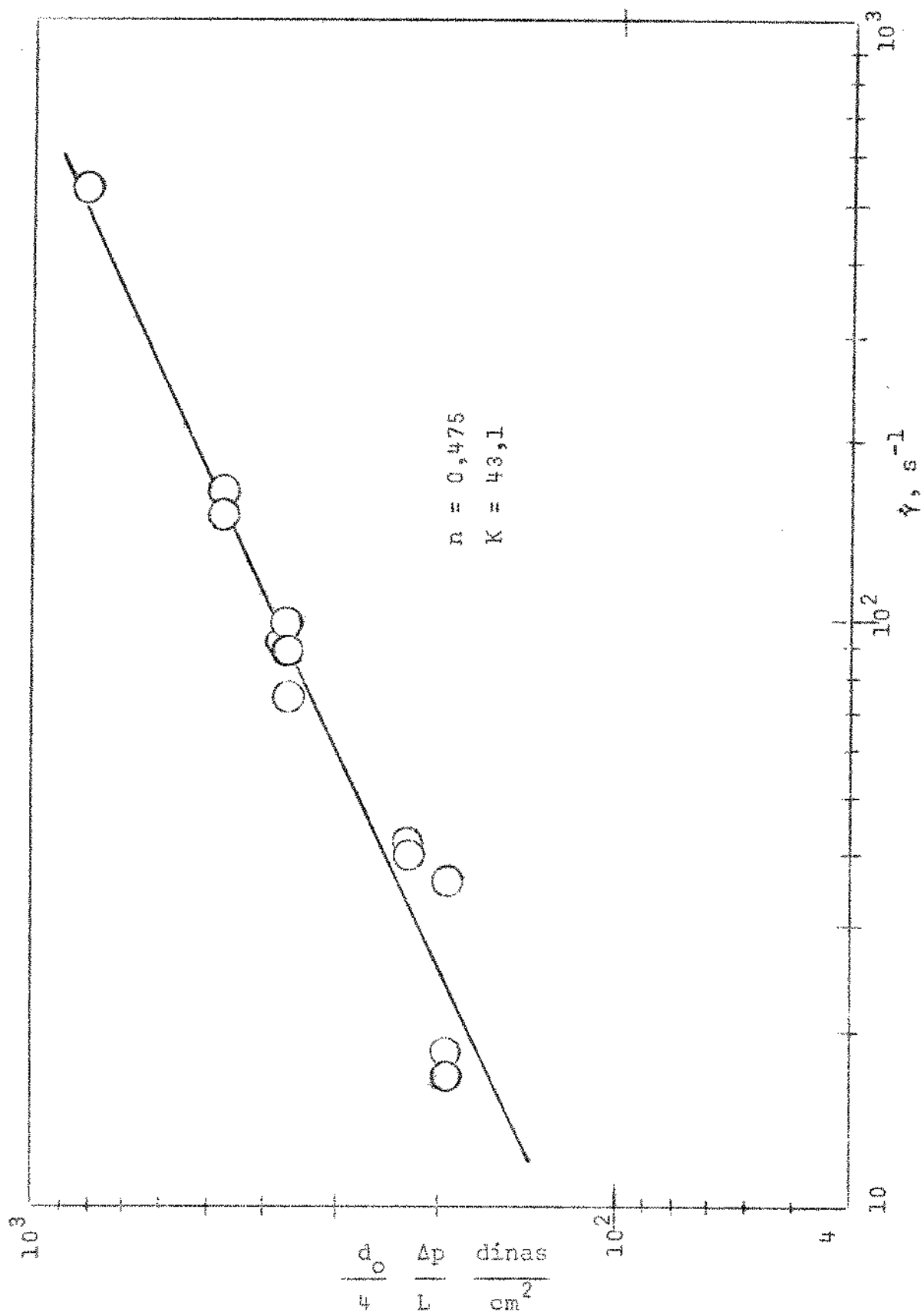


Figura 9 - Diagrama Básico do purê de goiaba, ($t = 23,4 \pm 1^{\circ}\text{C}$)

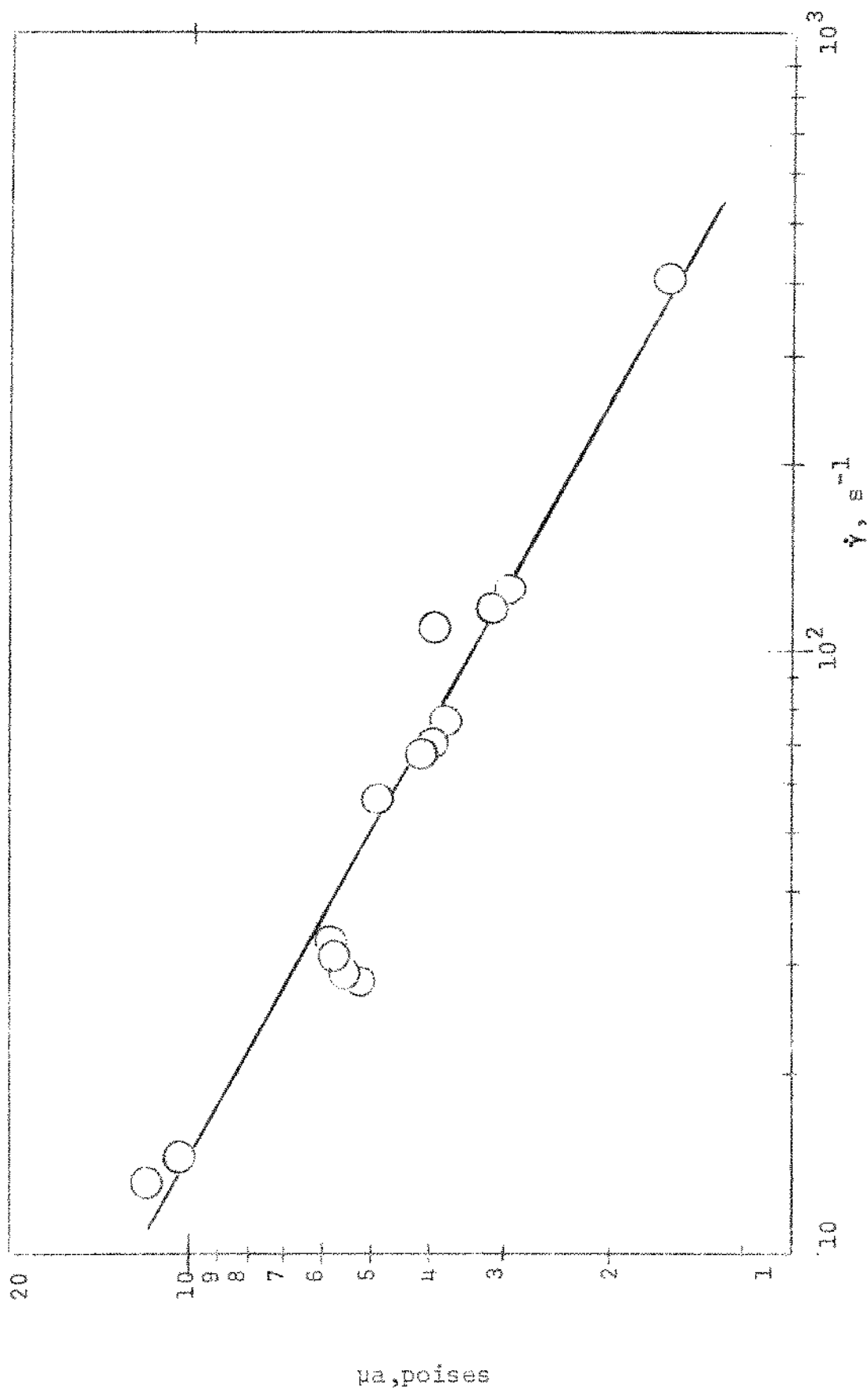


Figura 10 - Viscosidade do purê de goiaba, ($t = 23,4 \pm 1,9^\circ C$)

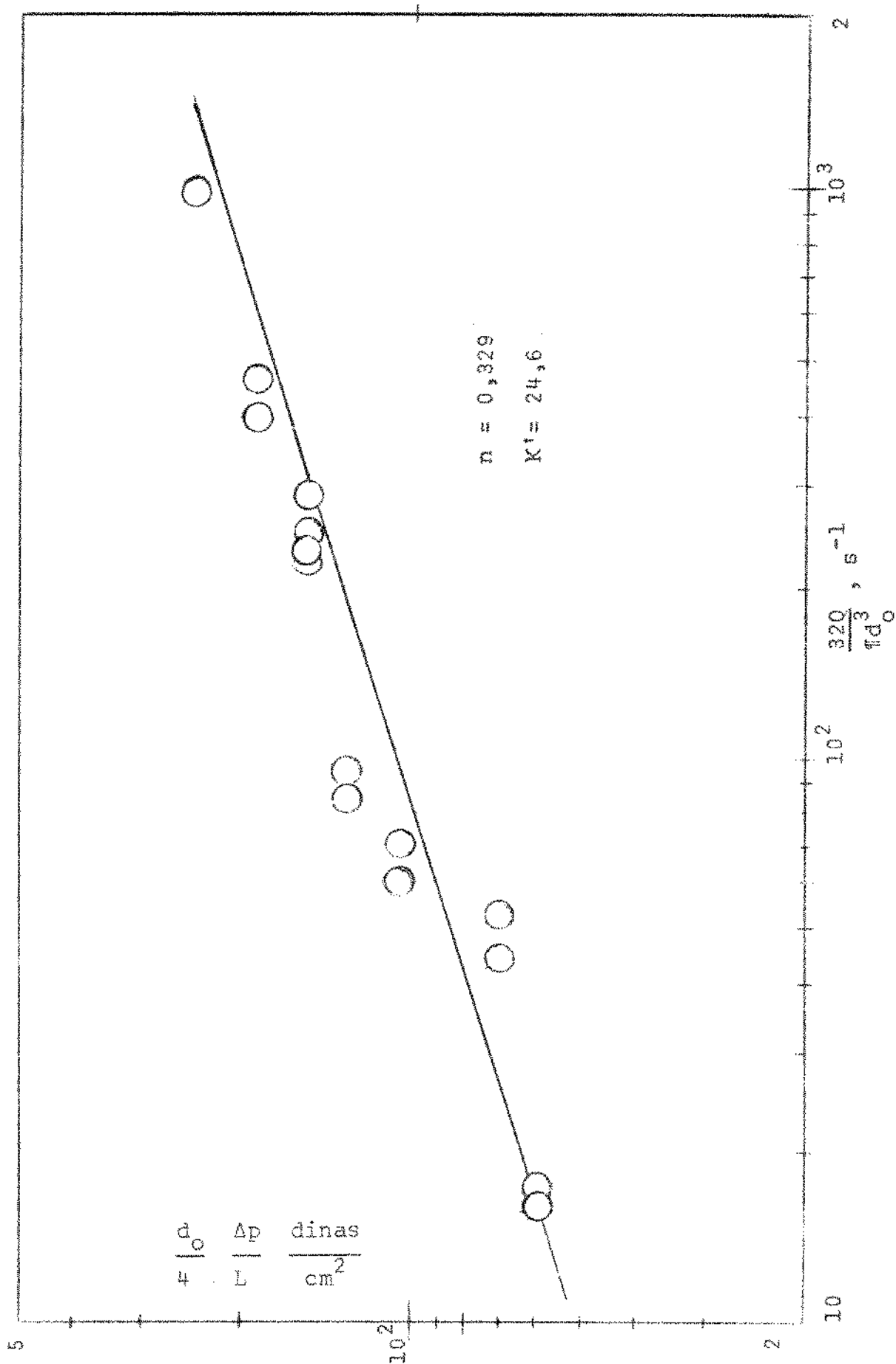


Figura 11, Diagrama Capilar do purê de manga, ($t = 24,2 \pm 1,0$)

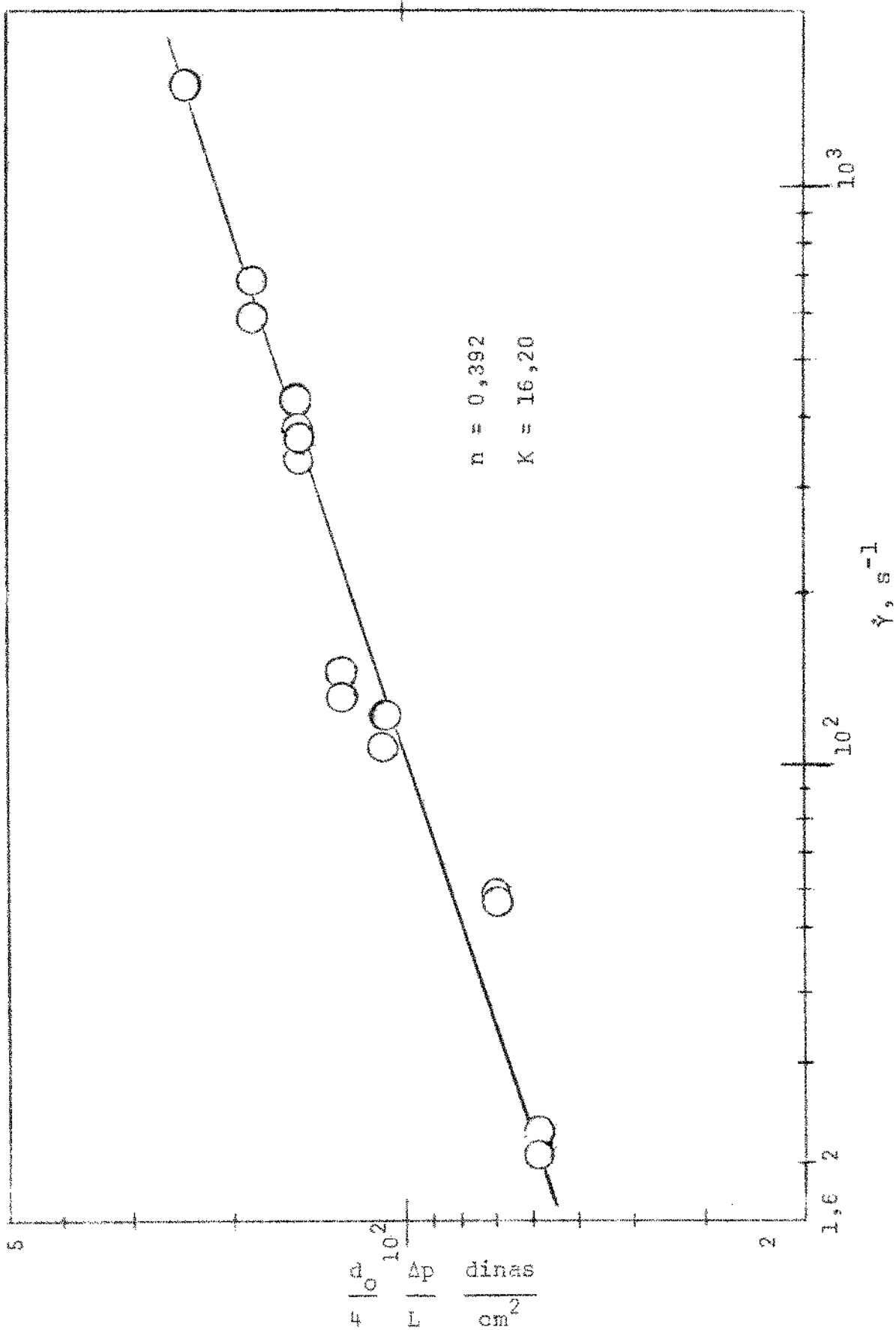


Figura 12 - Diagrama Básico do purê de manga, ($t = 24,2 \pm 19C$)

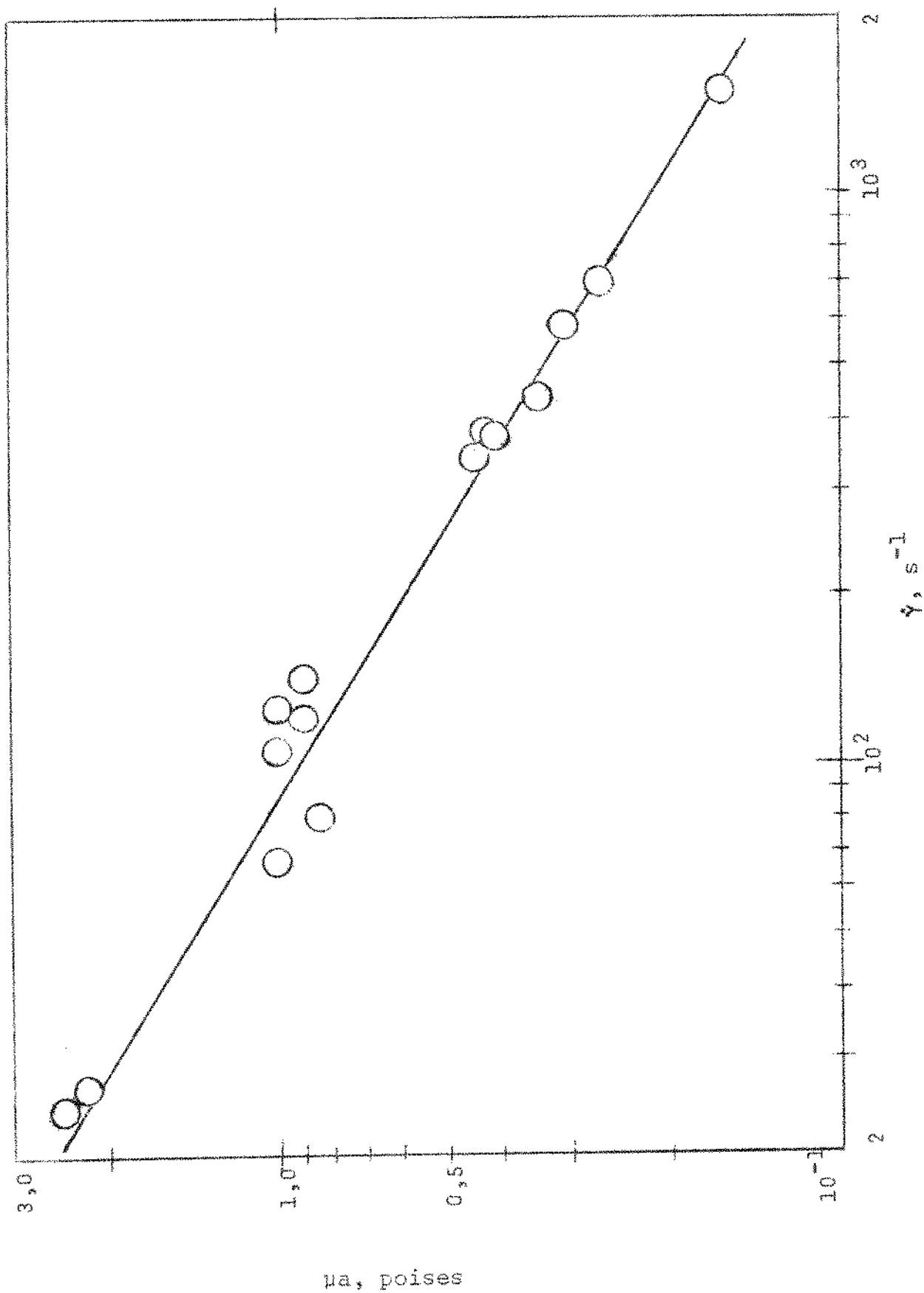


Figura 13 - Viscosidade do purê de manga, ($t = 24,2 \pm 1,0^\circ\text{C}$)

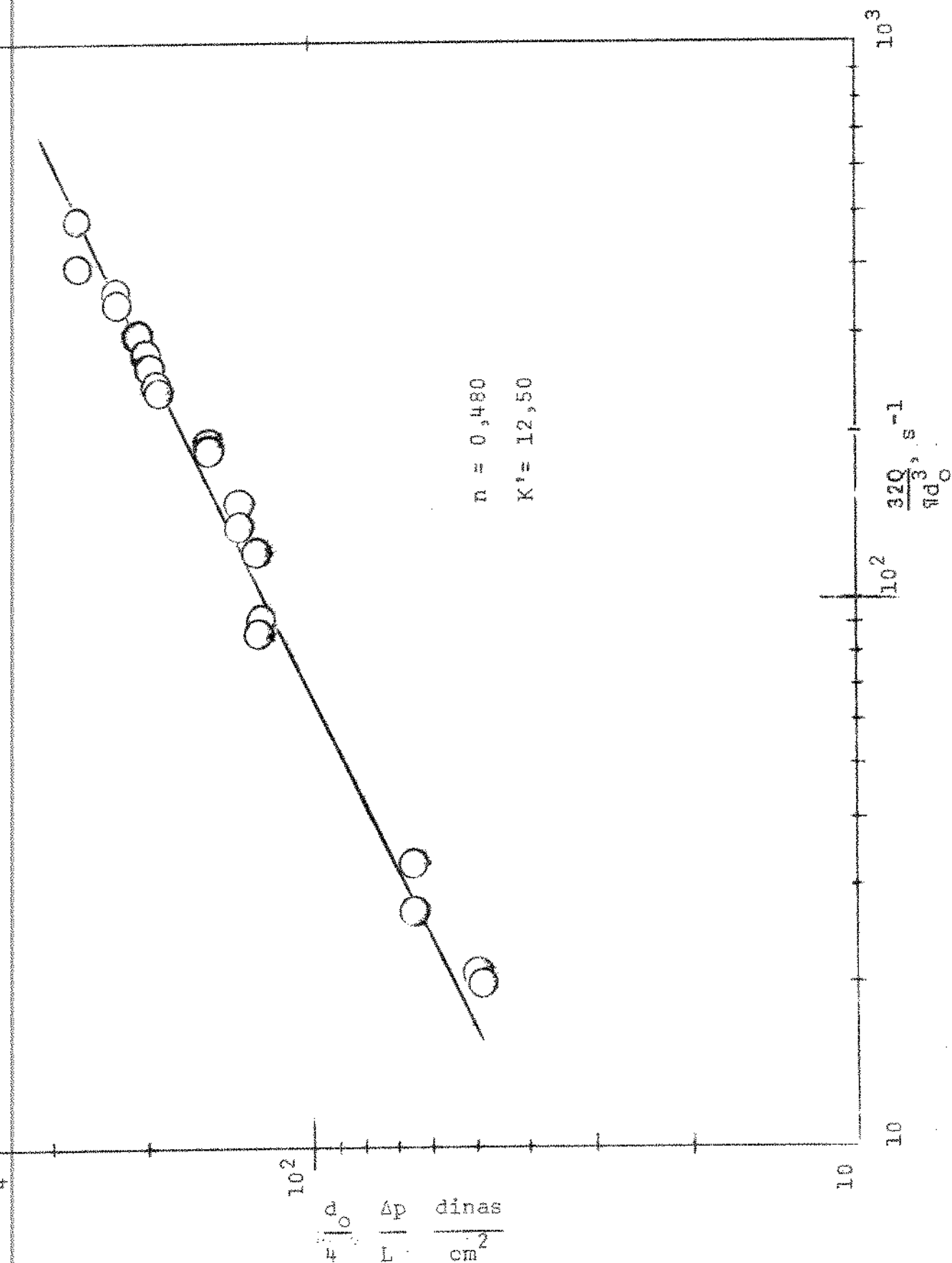


Figura 14 - Diagrama Capilar do purê de mamão, ($t = 26,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$)

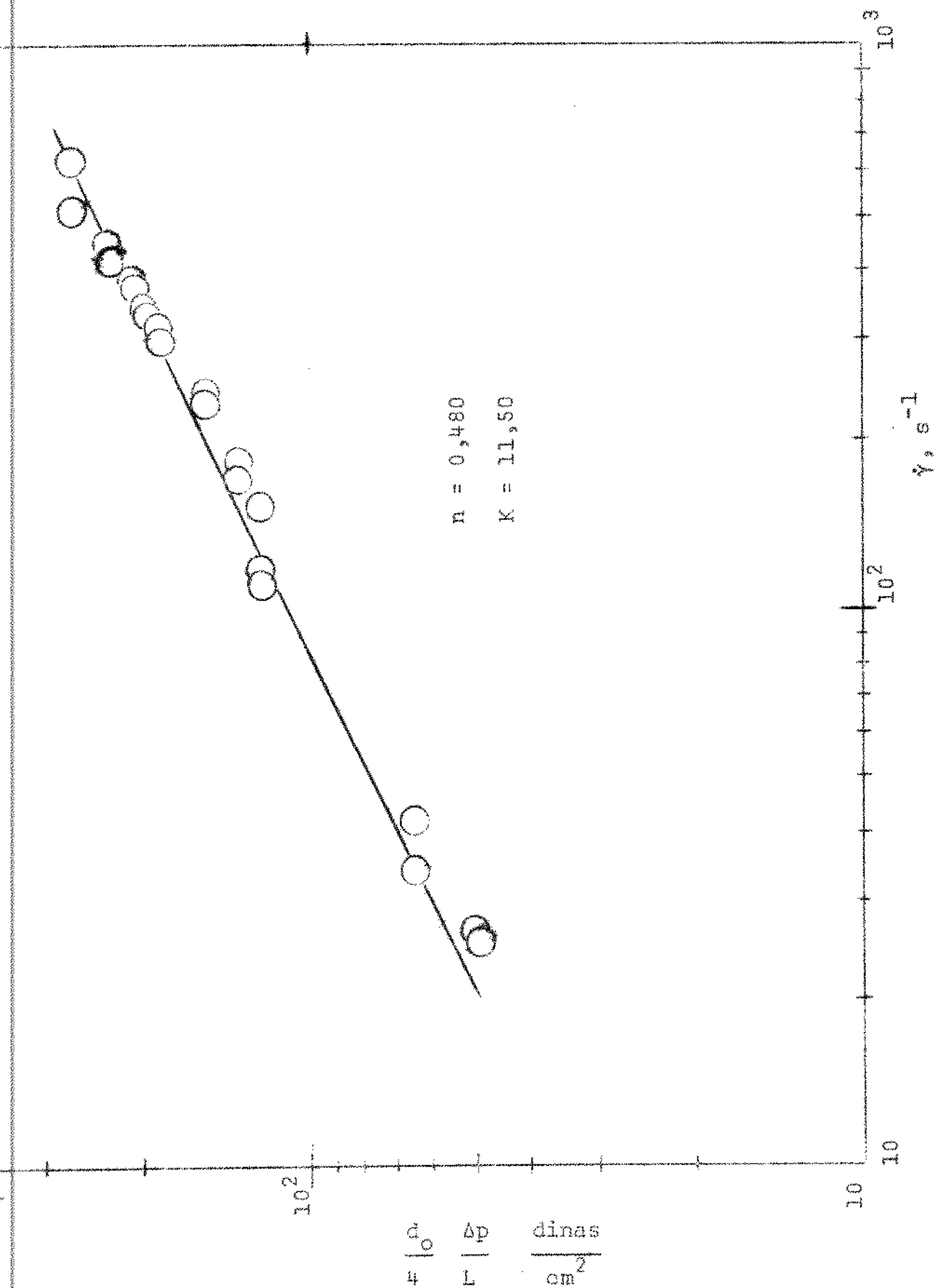


Figura 15 - Diagrama básico do purê de mamão, ($t = 26,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$)

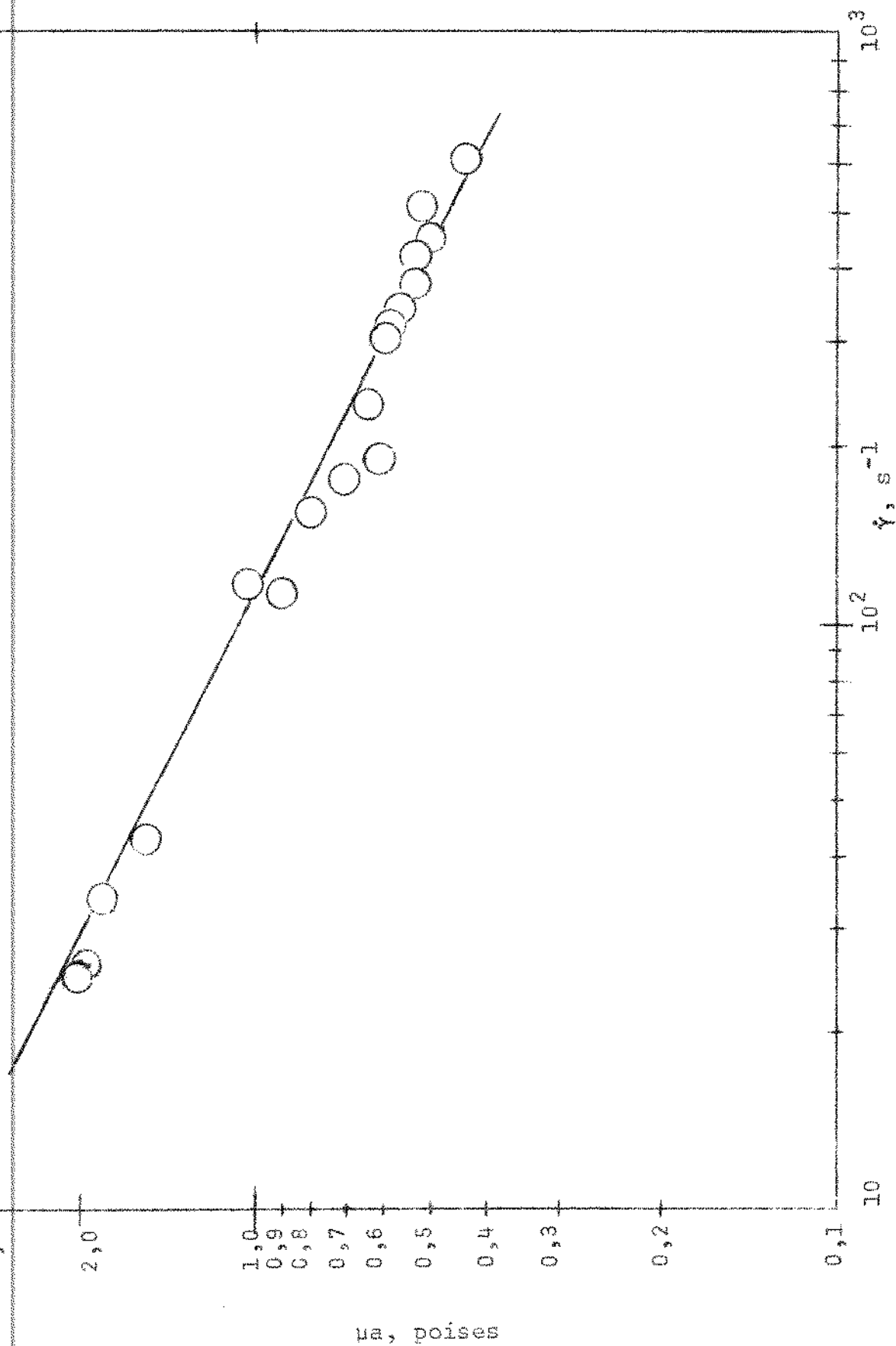


Figura 16 - Viscosidade do purê de mamão, ($t = 26,0 \pm 1^{\circ}C$)

VII. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram discutidas as características do desempenho do viscosímetro testado e a validade dos resultados obtidos.

(a) Discussão das características do desempenho do viscosímetro

van Wazer e col (1963), afirmam que os viscosímetros de tubos, possuem erros intrínsecos que devem ser tomados em conta na avaliação da qualidade das medições. As fontes de erros estabelecidas por van Wazer foram: (i) erros devido às perdas de energia cinética, estas influem na determinação dos valores da tensão cisalhante. Metzner (1956), indica que o erro cometido pode ser avaliado pela seguinte equação:

$$\Delta p_{\text{obs}} - \Delta p_{\text{real}} = \frac{\rho Q^2}{\alpha \eta^2 r^4}$$

onde α , é o fator de correção da energia cinética, cujo valor depende a sua vez do índice de comportamento de fluxo n , podendo ser calculado da seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{(4n + 2)(5n + 3)}{3(3n + 1)^2}$$

Os valores dos erros na determinação das quedas de pressão na linha foram calculados, estabelecendo-se que os valores máximos dos erros nas determinações da tensão cisalhante em cada purê testado, devidos às perdas de energia cinética foram: purê de goiaba 6,45 dinas/cm², purê de banana 2,20 dinas/cm², purê de manga 28,60 dinas/cm² e no purê de mamão 3,34 dinas/cm². (ii) erros provenientes dos chamados efeitos finais, foram considerados desprezíveis, uma vez que no desenho do viscosímetro, foram tomados valores de L_0/d maiores que 100, como foi sugerido por

Bouge (1959), por outro lado, as contrações e expansões da linha do viscosímetro foram construídas de modo tal que se evitassem câmbios bruscos de seção reta, preferindo-se formas afuniladas (iii) Os efeitos de turbulência, foram desprezados, levando em conta que as corridas experimentais foram conduzidas a baixos números de Reynolds. A avaliação do número de Reynolds generalizada foi realizada de acordo à seguinte expressão:

$$N_{Re} = \frac{4\omega \gamma_{ps}}{\eta d_0 \tau_0}$$

onde ω , é a taxa de escoamento espremida em unidades de massa por unidade de tempo. Os valores máximos dos números de Reynolds em cada corrida foram: teste com purê de goiaba 17,4, com purê de banana 3,3, com purê de manga 75,3 e com purê de mamão 18,9, o qual descartava qualquer possibilidade de fluxo turbulento. (iv) Outras fontes de erro como aderência às paredes, foram desprezadas, por serem mais frequentes em viscosímetros de capilar de vidro. (v) Erros devido ao fluxo não isotermico assim como os efeitos de deslizamento na parede, não foram levados em conta, desde que Metzner (1962), reconhece que o curto tempo de permanência do fluido no tubo viscosímetro evita o acúmulo de calor, segundo Metzner, esta afirmação é suportada nos resultados experimentais de um trabalho feito por Toor, no qual o escoamento de um fluido de 10 poises de viscosidade em um tubo de 0,025 polegadas de diâmetro interno, tendo uma relação L/d igual a 500 e submetido a uma taxa de deformação de 10^4 s^{-1} , atingia como máximo, um acréscimo de temperatura de 1 °F.

Os erros experimentais devido às imprecisões dos aparelhos de medida foram: medida de pressão $\pm 2 \text{ mm de Hg}$, erro na determinação do diâmetro interno dos tubos $\pm 0,01 \text{ cm}$, erro na determinação da densidade $\pm 0,002 \text{ g/cc}$, e o erro na determinação do fluxo $\pm 0,1 \text{ g}$. Desta maneira, somados os erros estimou-se que as imprecisões dos dados experimentais eram da ordem de 5%, incluindo aqui os erros de operação que foram estimados em 3%.

Os efeitos da variação nas determinações devidas às variações dos diâmetros dos tubos, foi desprezada, uma vez que no teste com purê de banana empregaram-se tubos de 0,454 cm e 0,812 cm obtendo-se resultados concordantes que foram correlacionados à Lei da Potência. A principal dificuldade observada no viscosímetro testado foi que a altas taxas de deformação, era difícil obter regime permanente uma vez que a capacidade do recipiente, era muito pequena, pelo que não foi possível obter dados a elevadas taxas de deformação.

(b) Discussão da validade dos resultados experimentais

(i) As possibilidades de comportamento tixotrópico foram descartadas, desde que não foram observados efeitos de dependência do tempo. As discrepâncias dos resultados da taxa de deformação observada na prova nº 1 do teste do purê de goiaba, mas que a efeitos de dependência do tempo, foram atribuídas a erros experimentais e às variações da temperatura ambiente, uma vez que as outras determinações não apresentavam tais discrepâncias.

(ii) Os dados experimentais submetidos a uma análise estatístico permitiram obter as expressões da Lei da Potência para cada purê. Empregou-se o método dos mínimos quadrados (Baird 1964) para fixar os parâmetros de comportamento reológico (a tabela 2 mostra os parâmetros), logo após se fez uma regressão linear, e o Teste de Fisher (Mickley e col 1957), foi empregado na determinação da probabilidade de que os dados experimentais pertenceram a uma linha reta. Os raios de correlação indicaram que, os dados do purê de banana possuíam 95% de probabilidade, para os dados dos purês de goiaba, manga e mamão, indicaram 99% de probabilidade. Os parâmetros reológicos indicaram que os purês testados apresentavam comportamento pseudoplástico, uma vez que os índices "n" eram menores que a unidade, condição necessária e suficiente do comportamento pseudoplástico, segundo o modelo da Lei da Potência.

(iii) Os parâmetros de comportamento reológico, foram comparados com os publicados na literatura. Os parâmetros do purê de banana ($n = 0,492$ e $K = 40,91$), compararam-se com os resultados de Charm (1960), resultando concordantes com os dados do purê de banana Brand B, obtidos a 24°C em um viscosímetro de tubos. Os parâmetros de comportamento reológico do purê de manga ($n = 0,329$ e $K = 24,60$) foram concordantes com os obtidos por Rao (1972), à temperatura de 25°C em um viscosímetro Contraves, Rao determinou $n = 0,32$. Os dados apresentados pelo relatório anual do ICAITI (1972), para os mesmos purês estudados por nós, não puderam ser comparados quantitativamente, uma vez que as determinações feitas por eles foram a 40°C , teor de sólidos maior e não apresentaram detalhes das terminações nem do tipo de viscosímetro usado. Em termos qualitativos, as comparações mostraram que, o maior conteúdo de sólidos no purê da mesma fruta, confere ao comportamento reológico do purê maior pseudoplasticidade, além da maior consistência como se exprime dos resultados apresentados por eles. A seguinte tabela mostra as características dos purês e as constantes reológicas determinadas pelo ICAITI:

Tabela 7

Dados dos purês e constantes reológicas a 40°C (ICAITI)

<u>Fruta</u>	<u>Variedade</u>	<u>°Brix</u>	<u>n</u>	<u>K (dinas/cm².sⁿ)</u>
Banana	Criolla	26,5	0,34	85,75
Banana	Valery	25,0	0,39	58,91
Goiaba	-----	14,8	0,38	111,17
Manga	Amatillo	23,0	0,26	107,6
Manga	Mamey	24,8	0,28	276,2
Mamão	-----	12,6	0,23	53,25

VIII. CONCLUSÕES

1. As expressões matemáticas da Lei da Potência, as curvas de fluxo e as curvas da viscosidade, indicaram que os pu rês testados, apresentavam comportamento pseudoplástico. Os parâ metros reológicos sumarizados na Tabela 2, mostraram que o pu rê de manga possuía caráter mais pseudoplástico, uma vez que seu índice de comportamento de fluxo (0,329), era menor que os índices dos outros purês.

2. O viscosímetro de tubos empregado nas determina ções, mostrou que era apropriado nas determinações reológicas, uma vez que a análise dos resultados indicou que estes eram re produzíveis na faixa de $\pm 5\%$. Por outro lado, também foi verifi cado que as fontes de erro próprias de todo viscosímetro de tu bos (van Wazer e Col. 1963), foram minimizadas e a análise dos erros decorrentes de não considerar tais grandezas nas calcula ções apresentadas, indicou que sua influência era desprezível.

3. As discrepâncias observadas nos valores da taxa de deformação da prova nº 1, no teste do purê de goiaba, foram atribuídas a erros experimentais e às perturbações da temperatu ra ambiente, mais de que a efeitos de dependência do tempo, uma vez que no mesmo purê, as outras determinações não apresentavam variações tão marcadas.

4. As provas experimentais com dois tubos de dife rente diâmetro (0,454 e 0,812 cm) do teste de purê de banana, mostraram que as variações da dimensão do tubo, tinha escassa influência nas determinações experimentais, como foi provado pos teriormente pelo tratamento estatístico dos dados obtidos e cor relacionados à Lei da Potência.

5. Os resultados experimentais do teste com purê de banana, foram comparados com os valores experimentais de Charm (1960), encontrando-se nossos dados concordantes com os obtidos por ele a 24°C num viscosímetro de tubos para purê de banana da variedade Brand B na que se determinou $n = 0,458$ e

$k = 65$. Os dados do purê de manga, foram comparados com os dados de Rao (1972), para determinações feitas a 25°C em um viscosímetro Contraves, o valor de n determinado por ele era 0,32 o qual era concordante com nossa determinação à temperatura de $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$. A comparação de nossos resultados com aqueles apresentados no relatório anual do ICAITI (1972), para os purês de banana, goiaba, manga e mamão, só puderam ser feitas em termos qualitativos, uma vez que as concentrações dos purês que testaram foram bem maiores que as nossas, além disso, a informação dos detalhes experimentais foram escassos. Mesmo assim os valores das constantes reológicas determinadas à temperatura de 40°C , comparadas com as nossas, sugerem que o comportamento pseudoplástico se faz mais marcado com a maior quantidade de sólidos contido no purê, pela mesma razão, o índice de consistência é maior.

APENDICE A

TIPOS DE VISCOSÍMETROS

Na prática, são disponíveis dois tipos básicos de viscosímetros. Os de Capilares ou de Tubos e os Rotacionais.

(a) Viscosímetros de Capilares ou de Tubos

Neste tipo de viscosímetro, o fluido é forçado a fluir através de um tubo de pequeno diâmetro mediante a aplicação de pressão externa. Os dados para se obter o diagrama básico de fluxo, são os seguintes: taxa de fluxo volumétrico, tensão cisalhante e as dimensões exatas do tubo.

Em geral um viscosímetro deste tipo consiste das seguintes partes: Recipiente de fluido, unidade de controle e medida de pressão, unidade de medida da taxa volumétrica de fluxo e unidade de controle de temperatura.

Os viscosímetros de capilares comercialmente disponíveis são: de Cilindro-Pistão, de Capilar de Vidro e Viscosímetros de Orifício (van Wazer e Col., 1963).

Viscosímetros de Cilindro-Pistão. Nestes viscosímetros, o mecanismo acionador pode ser um desenho pneumático ou um peso morto, que desloca um pistão forçando o fluxo do líquido encerrado no cilindro. Apresentam a vantagem de permitir elevadas pressões para o trabalho com materiais de elevada viscosidade. Mas a principal desvantagem consiste nas perdas de pressão devido aos efeitos de atrito entre o cilindro e o pistão. Empregados como Plastômetros, Reômetros ou Consistômetros especialmente na tecnologia de polímeros.

Viscosímetros de Capilar de Vidro. Seu uso é limitado a líquidos de baixa viscosidade, especialmente para fluidos Newtonianos. Emprega-se pressão externa, mas esta não poderá ser maior que 5 lbs. por polegada quadrada. Entre os modelos mais

usados, tem-se o Viscosímetro de Ostwald e o de Cannon-Fenske. As principais desvantagens destes viscosímetros são os problemas de aderência do fluido às paredes do tubo capilar e problemas de drenagem (van Wazer e col., 1963).

Viscosímetros de Orifício. Embora tenham sido empregados inicialmente na indústria, este tipo de viscosímetro não é apropriado para estudos reológicos, uma vez que as determinações provêm de uma péssima combinação das variáveis geométricas do aparelho com as do fluido. Em suma, carecem de valor prático.

(b) Viscosímetros Rotacionais

Na prática são muito empregados dado que, as medidas da viscosidade, tensão cisalhante e taxa de deformação são obtidas diretamente das leituras do sistema de registro que possuem. As determinações são feitas pela conversão do torque entregue por um motor de velocidade variável a um eixo que possui no seu extremo um elemento que gira imerso no fluido testado. São dois os tipos de viscosímetros mais utilizados: o de Cone-e-Prato, e o de Cilindros Concêntricos, havendo muitas outras variações destes tipos. van Wazer e col (1963), apresentaram detalhes das informações sobre os diferentes modelos disponíveis.

Viscosímetro Rotacional de Cone-e-Prato. Neste tipo de instrumento, o fluido é cisalhado numa pequena fenda entre um prato e um cone. O fluido é mantido em seu interior pela ação das tensões viscosas contra a força centrífuga. As principais dificuldades surgem quando são testados materiais de baixa viscosidade a elevadas tensões. Provavelmente isto se deva ao escoamento de parte do fluido fora do viscosímetro. Outro problema poderia ser a existência de fluxos secundários devido à força centrífuga. Se existe deslizamento nas superfícies, é impossível a obtenção de dados reproduzíveis.

Viscosímetro de Cilindros Concêntricos. Estes instrumentos consistem de um recipiente cilíndrico e um cilindro maior concêntrico. No espaço entre ambos, o fluido é submetido à

tensão cisalhante produzida pela rotação do cilindro maciço ou do recipiente. Um aparelho de registro computa as variáveis que serviram na determinação do diagrama básico de fluxo. A desvantagem principal é a dificuldade em eliminar os chamados efeitos finais; não obstante, bons resultados tenham sido conseguidos no desenho de Contraves. Outra dificuldade que apresentam é a limitada faixa de tensão cisalhante disponível. Curda e Bohuslava (1968), indicaram que no trabalho com suspensões, existe a possibilidade de sedimentação e/ou centrifugação das partículas, o que favorece a formação de uma camada de líquido nas paredes e desta maneira, a distribuição da tensão cisalhante não atinge o grosso da dispersão.

APENDICE B

CONSIDERAÇÕES NO DESENHO DO VISCOSÍMETRO TESTADO

Tinha-se como referências básicas os modelos dos viscosímetros de tubos empregados por Saravacos (1968) e Charm (1960). Aqueles modelos apresentam fontes de erros que precisavam ser minimizadas a fim de se obter resultados mais exatos. As fontes principais de erros eram:

a. Devido aos efeitos finais: Em ambos viscosímetros, não se tinha certeza de haver atingido condições de fluxo totalmente desenvolvido em todo o comprimento do tubo viscosimétrico. Isto implicava em que a tensão cisalhante calculada a partir dos dados de diferença de pressão, não era correta.

b. No caso do desenho de Saravacos, não era considerado que o efeito da variação da carga hidrostática, afeta as medidas da diferença de pressão no comprimento do tubo. Além disso, a válvula de tipo bola na conexão do tubo viscosimétrico, produzia perdas de carga permanentes que afetavam as medições, e finalmente, tanto os modelos de Saravacos como o de Charm, empregavam na determinação das quedas de pressão na linha, manômetros tipo Bourdon cuja precisão era muito grosseira.

Baseando-se nestas considerações, foi projetado um modelo que pudesse minimizar as fontes de erros anteriormente analisadas.

O comprimento inicial; foi dimensionado de modo tal que pudesse assegurar fluxo totalmente desenvolvido antes da primeira tomada de pressão, evitando assim erros nas medições da tensão cisalhante. Para materiais Newtonianos, existem correlações que permitem o cálculo do comprimento inicial em função do número de Reynolds (Knudsen e Katz, 1958). Mas, para materiais não-Newtonianos a informação é dispersa e muitas vezes não concordante (Brodkey, 1967), numa excelente análise experimental do problema, concluiu entre outras coisas, que "para aliviar os

efeitos finais recomenda-se o uso de um comprimento igual ou maior que cem vezes o diâmetro interno do tubo". Mendelson(1969), trabalhando com fluidos viscoelásticos em capilares, obteve valores consistentes até com comprimentos iguais a 60 diâmetros. Para o comprimento inicial do desenho testado, foi tomado em média um valor de 120 diâmetros nominais.

Por outro lado as uniões, curvaturas e contrações, foram projetadas para reduzir as perdas permanentes de carga, procurando-se curvas suaves e contrações afuniladas. O manômetro foi do tipo em U, com mercúrio como fluido manométrico, uma vez que isto permitia maior precisão nas determinações da tensão cisalhante. O manômetro consistia de dois tubos de vidro de 9 mm. de diâmetro interno, unidos pela base com mangueiras de Tygon a fim de ser evitadas fraturas do vidro, ocasionadas por eventuais variações bruscas de pressão na linha.

As dimensões do viscosímetro e detalhes do desenho, são mostrados na Tabela B-1 e na Figura 3 respectivamente.

TABELA B-1

Dimensões do viscosímetro

Corpo do Viscosímetro:

Diâmetro interno.....	20,1 cm.
Altura do cilindro reto	19,3 cm.
Altura do tronco de cone.....	11,5 cm.
Comprimento do tubo de descarga.....	15,3 cm.
Diâmetro nominal do tubo de descarga.....	1,0 polegada
Diâmetro nominal da redução.....	3/8 polegadas

(continua...)

(continuação)

Tubos do Viscosímetro:

Diâm. Nominal poleg.	Diâm. int. . d_o . cm.	L_o cm.	L cm.	L_1 cm.	L_o/d_o
1/4	0,452	74,0	63,5	36,0	164
3/8	0,812	123,5	115,5	38,5	152
1/2	1,170	155,1	102,1	51,0	132

APENDICE C

EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO EM TUBOS

Nas seguintes derivações, supõe-se:

a. Regime Permanente e fluxo totalmente desenvolvido, no qual a velocidade é constante com o tempo, b. O vetor velocidade não possui componentes radiais nem tangenciais e a velocidade axial, é função unicamente da posição no eixo, c. Não existe deslizamento na parede, isto é, $u_x = 0$, quando $r = d_o/2$, d. Não se tem efeitos finais, uma vez que o comprimento do tubo é suficientemente grande, e. O fluido é incompressível e o escoamento é isotérmico, f. A viscosidade aparente varia apreciavelmente com as variações de pressão.

Seja um elemento de fluido de diâmetro d_o , comprimento L , sujeito a uma diferença de pressão Δp , nas condições anteriormente supostas, vai-se-lhe aplicar as equações de movimento e de continuidade.

De equação do movimento se tem:

$$\Delta p \pi r^2 = 2 \pi r \Delta L \tau_{rx} \quad (c-1)$$

e para $r = d_o/2$,

$$\Delta p \frac{\pi}{4} d_o^2 = \pi d_o \Delta L \tau_o \quad (c-2)$$

onde:

$0 \leq r \leq d_o/2$, τ_{rx} é a tensão cisalhante nas paredes do elemento de raio r , τ_o é a tensão cisalhante na parede do tubo quando $r = d_o/2$.

Combinando (c-1) e (c-2), obtem-se:

$$\tau_{rx} = \frac{2r}{d_o} \tau_o \quad (c-3)$$

A equação (c-3) indica variação linear de τ_{rx} com r .

Da equação de continuidade:

$$Q = \left(\frac{\pi}{4}\right) d_o^2 \bar{u}$$

onde $\bar{u}$ é a velocidade média definida pela relação:

$$\bar{u} = \frac{4Q}{\pi d_o^2} \quad (c-4)$$

De modo geral, o valor da taxa de escoamento é:

$$dQ = \int_0^{d_o/2} 2\pi r u_x dr \quad (c-5)$$

A integração por partes da equação (5), rende:

$$Q = \left| \pi r^2 u_x \right|_0^{d_o/2} - \pi \int_0^{d_o/2} r^2 \left(\frac{d u_x}{dr} \right) dr \quad (c-6)$$

Nesta equação o primeiro termo da mão direita é zero, desde que $u_x = 0$, quando $r = 0$. O termo $-\left(\frac{d u_x}{dr} \right)$, é a taxa de deformação $\dot{\gamma}$.

Agora o objetivo é encontrar uma solução da equação (c-6) em termos da taxa de deformação e da tensão cisalhante. Da equação (c-3) pode-se obter o valor da diferencial de r , exprimir $-\left(\frac{d u_x}{dr} \right) = f(\tau_{rx})$, e substituir os valores na equação (c-6).

$$-\frac{\pi}{4} d_o^2 \bar{u} = \frac{\pi d_o^3}{8\tau_o} \int_0^{\tau_o} \tau_{rx}^2 f(\tau_{rx}) d\tau_{rx}$$

A mesma equação simplificada rende:

$$\left(\frac{8 \bar{u}}{d_o}\right) = \frac{4}{\tau_o^3} \int_0^{\tau_o} \tau_{rx}^2 f(\tau_{rx}) d\tau_{rx} \quad (c-7)$$

Por analogia com o termo $-\left(\frac{d u_x}{dr}\right)$:

$$\left(\frac{8 \bar{u}}{d_o}\right) = \phi(\tau_o)$$

desde que ele representa a taxa de deformação na parede do tubo. Então a equação (c-7) rende:

$$\tau_o^3 \phi(\tau_o) = 4 \int_0^{\tau_o} \tau_{rx}^2 f(\tau_{rx}) d\tau_{rx} \quad (c-7a)$$

diferenciando ambos membros com relação a τ_o , obtém-se:

$$3\tau_o^2 \phi(\tau_o) + \tau_o^3 \frac{d(\phi(\tau_o))}{d\tau_o} = 4\tau_o^2 f(\tau_o)$$

que rearranjada é:

$$\frac{3}{4} \phi(\tau_o) + \frac{\tau_o}{4} \frac{d(\phi(\tau_o))}{d\tau_o} = f(\tau_o) \quad (c-8)$$

Esta equação é a famosa equação de Weissenberg, Rabinowitsch e Mooney (WRM), que é aplicável ao fluxo laminar em canos, independente da natureza do fluido.

A equação (c-8), pode-se rearranjar do modo seguinte:

$$f(\tau_o) = \phi(\tau_o) \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{\frac{d(\phi(\tau_o))}{\phi(\tau_o)}}{\frac{d\tau_o}{\tau_o}} \right] \quad (c-8a)$$

e definir:

$$n = \frac{\frac{d(\phi(\tau_o))}{\phi(\tau_o)}}{\frac{d\tau_o}{\tau_o}} = \frac{d \ln \phi(\tau_o)}{d \ln \tau_o} \quad (c-9)$$

A expressão (c-9) é a definição do índice de comportamento reológico baseado no diagrama básico. Substituindo (c-9) em (c-8a), se tem:

$$f(\tau_o) = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{8 \bar{u}}{d_o} \right) \quad (c-10)$$

ou se preferir:

$$\left(\frac{d_{ux}}{dr} \right)_{\text{parede}} = \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \left(\frac{32 Q}{\pi d_o^3} \right) \quad (c-11)$$

ou também

$$\gamma_{\text{parede}} = \left(\frac{3n + 1}{4n} \right) \left(\frac{32 Q}{\pi d_o^3} \right) \quad (\text{c-12})$$

APENDICE D

EQUAÇÕES REOLÓGICAS DE ESTADO

Vão ser discutidas brevemente alguns dos mais importantes modelos matemáticos sugeridos por diversos autores, para expressar por meio de equações, as relações entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação. A maioria dos modelos são sustentados em bases empíricas e/ou semi empíricas, e outros em considerações moleculares, Brodkey (1967). Todos eles assumem um mecanismo específico que explique a reação do fluido perante o efeito da tensão cisalhante.

Modelo dos Plásticos Ideais - Bingham

$$\tau_{yx} - \tau_0 = - \mu \left(\frac{du_x}{dy} \right)$$

válida para materiais que possuem tensão cisalhante crítica. τ_0 .

$$\left(\frac{du_x}{dy} \right) = 0, \text{ quando } \tau_0 \geq \tau_{yx}$$

Modelo de Ostwald-de Waele - Lei da Potência

$$\tau_{yx} = - K \left(\frac{du_x}{dy} \right)^{n-1} \left(\frac{du_x}{dy} \right)$$

onde "K" e "n" são constantes reológicas do fluido

K é chamado índice de consistência.

n é chamado índice de comportamento reológico. Este índice

pode assumir valores maiores, menores ou iguais à unidade, dependendo do comportamento do fluido.

Se : $n < 1$, o fluido é pseudoplástico ou "shear thinning".

$n = 1$, o fluido é Newtoniano.

$n > 1$, o fluido é dilatante ou "shear thickening".

A equação do modelo anterior, tem sido muito objetada por ser totalmente empírica e por não ser válida para valores da tensão cisalhante muito baixos ou muito elevados, não obstante isso, na prática da Engenharia é a equação mais usada (Metzner, 1956).

Modelo de Ellis

$$-\left(\frac{du_x}{dy}\right) = \left(\frac{1}{u_0} + K \tau_{yx}^{n-1}\right) \tau_{yx}$$

onde u_0 , é a viscosidade quando a taxa de deformação é zero. K e n são parâmetros reológicos já definidos.

Modelo de Sisko

$$\tau_{yx} = - \left[u_\infty + K \left| \frac{du_x}{dy} \right|^{n-1} \right] \frac{du_x}{dy}$$

aqui u_∞ , é a viscosidade quando a taxa de deformação é infinita. K e n, parâmetros reológicos.

Tanto o modelo de Ellis quanto o modelo de Sisko, expressam comportamento Newtoniano quando $K = 0$. No modelo de

Sisko, se a tensão cisalhante tende a zero, o modelo falha. O modelo de Ellis falha quando a tensão cisalhante tende ao infinito. Ambos modelos são aplicáveis tanto ao comportamento pseudoplástico, quanto ao dilatante.

Modelo de Reiner-Philipoff

$$\tau_{yx} = - \left(u_{\infty} + \frac{u_0 - u_{\infty}}{1 + \frac{\tau_{yx}^2}{A}} \right) \frac{du_x}{dy}$$

A, é um parâmetro que depende do fluido e tem unidades de tensão cisalhante elevadas ao quadrado, o parâmetro deve ser avaliado empiricamente.

Modelo de Powell-Eyring.

$$\tau_{yx} = - \left(u_{\infty} + \frac{u_0 - u_{\infty}}{\beta \left(\frac{du_x}{dy} \right)} \right) \operatorname{sen} h^{-1} \left(\beta \frac{du_x}{dy} \right) \frac{du_x}{dy}$$

O modelo deriva da Teoria Cinética dos líquidos proposta por Eyring. Predisse comportamento pseudoplástico para valores finitos da tensão cisalhante. Tende assintoticamente ao comportamento Newtoniano, quando a tensão cisalhante tende a zero.

Modelo de Heschel-Buckley ou Modelo de Charm

$$\tau_{yx} - \tau_0 = -k \left(\frac{du_x}{dy} \right)^{n-1} \frac{dy_x}{dy}$$

O modelo é aplicável a um suposto tipo de fluido, que possuindo

características de pseudoplasticidade ou de dilatância, possua tensão cisalhante crítica τ_0 .

Modelo de Casson

$$\tau_{yx}^{0.5} - \tau_0^{0.5} = -k \left(\frac{du_x}{dy} \right)^{0.5}$$

Proposta para suspensões de sementes em óleos.

Modelo Generalizado de Bird.

$$-\left(\frac{du_x}{dr} \right) = \frac{1}{u_0} \left(\frac{\tau_m}{1 + \left(\frac{\tau_{rx}}{\tau_m} \right)^{n-1} \left(\frac{u_\infty}{u_0} \right)} \right) \tau_{rx}$$

Este modelo é muito versátil, pois predisse comportamento Newtoniano quando a tensão cisalhante tende a zero. A valores finitos da tensão cisalhante predisse comportamento pseudoplástico ou dilatante, dependendo do valor de n . Se $u_\infty = 0$, a equação transforma-se na equação do modelo de Ellis. Quando $n = 3$, a equação é equivalente à do modelo de Reiner-Philippoff.

As equações anteriores, provavelmente representem as aproximações mais usuais do comportamento não-Newtoniano e são limitadas no seu uso ao regime laminar. Bird e col. (1964), dizem que estas equações são fórmulas empíricas de ajuste de curvas, e por conseguinte, é aventurado empregá-las fora do intervalo dos dados experimentais utilizado na sua obtenção. Metzner (1956), assinala que ainda não se tem evidências que possam justificar o emprego destes modelos na prática, porém a Lei da Potência, pela sua simplicidade e amplo intervalo de aplicação

(de 100 a 1000 ciclos logarítmicos) é por enquanto, a expressão mais adequada para fixar os dados experimentais do digrama de fluxo.

BIBLIOGRAFIA

- Baird, D.C. (1964), "Experimentation: An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design". Prentice-Hall, New Jersey.
- Bird, R.B, Stewart, W.E, e Lightfoot, E.N. (1960), "Transport Phenomena". John Wiley & Son, New York, N.Y.
- Bouque, D.C. (1959), Ind. Eng. Chem. 51:875, citado por Brodkey, R.S. (1967), op.cit.
- Brodkey, R.S. (1967)"The Phenomena of Fluid Motions". Addison-Wesley Publishing Co. Reading Massachusetts.
- Charm, S.E, e Merrill, E.W. (1959). Heat Transfer Coefficients for Pseudoplastic Materials". Food Res. 24:319.
- Charm, S.E. (1960). Viscometry for Non-Newtonian Materials. Food Res. 25:351.
- Charm, S.E. (1962). The Nature and Rol of Fluid Consistency in Food Engineering Applications. Adv. Food Res. 11:356.
- Charm, S.E. (1963). "The Fundamentals in Food Engineering". Chapter 3, Flow of Fluids Products. AVI Publishing Co.Inc. Westport, Conn.
- Cox, R.G. e Breener, H. (1971). The Rheology of a Suspension in Newtonian Fluids. Chem. Eng. Sci. 26:65.
- Curda, D e Bohuslava, N. (1968) A Study of Rheological Proprierties of Pulpy Juices. Sci. Papers, Inst. Technol.,

Prague, E22:21.

- Davis, R.B, De Wesse, D e Gould, W. A. (1954). Consistency Measurements on Tomato Puree. Food Technol. 8:30.
- Ezell, G.H. (1959). Viscosity of Concentrated Orange and Grape fruit Juice. Food Technol. 13:9.
- Foda, Y.H e Mc Collum, J. P. (1970). Viscosity as Affected Various Constitutents of Tomato Juice. J. Food Sci. 35:333.
- Harper, J.C. e El Sharigi, A. F. (1965). Viscometric Behaviour of Tomato Concentrates. J. Food. Sci. 30:470.
- Higgs, S. J e Norrington, R. J. (1971). Rheological Proprieties of Selected Food Stuffs. Process Biochem. 615:52.
- Holdsworth, S.D. (1971). Applicability of Rheological Models to the Interpretation of Flow and Processing Behaviour of Fruid Products. J. Texture Studies. 2:393.
- ICAITI. (1972). Informe Anual del Proyecto Multinacional de Frutas Tropicales. OEA Guatemala.
- Knudsen, J.G e Katz, D. L (1958). "Fluid Dynamics and Heat Transfer". Mc Graw Hill, New York. N. Y.
- Kerst, Z. I e Laconti, J. D. (1944). Factors Determining the Consistency of Commercial Canned Tomato Juice. Technical Bulletin No272. New York State Agricultural Experimental Station, Geneva, N. Y.
- Luhl, B. S, Dempsey, W. H e Leonar, S (1954). Consistency of Paste and Puree from Pearson and San Marzano Tomatoes. Food Technol. 8:576.

- Marsaioli, J. A. (1965). Transmissão de Calor na Evaporação de Líquidos Não-Newtonianos em Tacho com Camisa de Vapor. Coletânea do ITAL. Campinas, S.P. I:181.
- Matz, S.A. (1962). "Food Texture". AVI Publishing Co. Inc. Westport, Conn.
- Mendelsson, R. A. (1969). Flow Proprierties of Polyethylene Melts, Polymer Eng. Sci. 5:350.
- Metzner, A. B. (1956). Non-Newtonian Technology Adv. Chem. Eng. Vol. 1 Academic Press, New York, N.Y.
- Metzner, A. B. (1962) "HandBook of Fluid Dynamics". Chapter 7. Flow on Non-Newtonian Fluids. Streeter Editor. Mc Graw Hill. New York. N. Y.
- Mickley, H. S, Sherwood, T. K. e Reed, C. E. (1957). "Applied Mathematics in Chemical Engineering". Second Edition. Mc Graw Hill. New York. N. Y.
- Mizarhi, S. e Berk, Z. (1970). Flow Behaviour of Concentrated Orange Juice, J. Texture Studies. 1:342.
- Rao, M. A. (1972) : Comunicação Pessoal. Dados não Publicados.
- Saravacos, G. D. (1968). Tube Viscosimeter of Fruit Purees and Juices. Food Technol. 22: 1585.
- van Wazer, J. R, Lyons, J. W, Kim, K. Y e Colwell, R. E. (1963), "Viscosity and Flow Measurements". Interscience Publishers, New York. N. Y.
- Wittenberger, R.T. e Nutting, G.C. (1957). Effect of Tomato Cell Structure on Consistency of Tomato Juice. Food Technol. 11:19.