



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



Centro de Ciências  
e Tecnologia

**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO E**  
**ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE CUPUAÇU**  
*(Theobroma grandiflorum Schum.)*

**MARIA FÁBIA PEREIRA CABRAL**

**Campina Grande - Paraíba**  
**AGOSTO - 2001**

---

MARIA FÁBIA PEREIRA CABRAL

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE CUPUAÇU  
(*Teobroma grandiflorum* schum.)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento as exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

---

Campina Grande - PB  
Setembro - 2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA UFPB

13

C 117c  
2001 Cabral, Maria Fábila Pereira  
Comportamento reológico da polpa de cupuaçu  
(*Theobroma grandiflorum* Schum.) / Maria Fábila Pereira  
Cabral. - Campina Grande: UFPB, 2001.  
106p.

Inclui bibliografia  
Dissertação (Mestrado). UFPB / CCT

1. Reologia 2. Polpa 3. Temperatura 4. Cupuaçu  
I. Título

CDU: 634.6

8,5

**DIGITALIZAÇÃO:**

**SISTEMOTECA - UFCG**



CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

**MARIA FÁBIA PEREIRA CABRAL**

Título: Comportamento reológico da polpa de cupuaçu  
(*Theobroma grandiflorum* Schum.)

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Alexandre J M Queiroz  
Dr. Alexandre José de Melo Queiroz - Orientador

APROVADA

Rossana Mª F de Figueirêdo  
Drª. Rossana Maria F. de Figueirêdo - Orientadora

Aprovada

Maria Elita Duarte Braga  
Drª. Maria Elita Duarte Braga - Examinadora

Aprovada

Flávio Luiz Honorato da Silva  
Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva - Examinador

Aprovada

AGOSTO - 2001

À minha mãe, Beníssia Pereira Cabral, que tenho certeza, deu o melhor de si para mim e é a razão pela qual acredito no amor.

Ao meu pai, Wilson Dias Cabral (in memoriam). A minha querida "mãe gelina", Angelina Ulisses Barbosa. Aos meus irmãos Fátima, Flávia, Fabiana, Wilson e Wilton. A todos os meus sobrinhos.

Dedico.

O melhor de si,

é a maior contribuição que você pode dar ao mundo.

(Louise L. Hay)

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, que com carinho e competência me orientou, tornando possível a realização deste trabalho.

À minha diletta Prof.<sup>a</sup> Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pela dedicação, paciente orientação e capacidade ímpar de resolver problemas.

Ao Prof. Dagumar Soares Bezerra, por ter concedido meu afastamento para a realização do curso.

À Capes, pela bolsa concedida.

Aos membros da banca examinadora, pelas importantes contribuições nas correções e sugestões.

À minha amiga Josalice de Lima Araújo, que esteve presente nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola - DEAg pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais - DEMa pela colaboração no desenvolvimento da parte experimental.

À Rivanilda, secretária da Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, uma das pessoas mais singular, que tive o prazer de conhecer.

A todos os amigos do curso, cuja convivência amiga foi importante para superar os obstáculos.

À minha querida cunhada Elisângela, pelo carinho e o apoio dedicados à minha pessoa. À Darcy Barbosa, pelo amor, estímulo e pelas orações.

À minha amiga Prof.<sup>a</sup> Juraci Galindo, pela colaboração na correção ortográfica. À Valdicle, pelo incentivo.

A este Universo de Deus, meu criador.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	ix
NOMENCLATURA .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	01
1.1 - Objetivo .....	03
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	04
2.1 - O cupuaçu .....	04
2.2 - Polpa de fruta .....	09
2.3 - Características químicas e físico-químicas .....	09
2.3.1 - pH.....	10
2.3.2 - Vitamina C.....	11
2.3.3 - Acidez titulável.....	12
2.3.4 - Sólidos solúveis (°Brix).....	13
2.3.5 - Pectina.....	14
2.3.6 - Umidade.....	16
2.4 - Reologia .....	16
2.4.1 - Fluidos newtonianos .....	19
2.4.2- Fluidos não-newtonianos.....	20

2.4.2.1 - Fluidos independentes do tempo.....	21
2.4.2.1.1 - Fluidos pseudoplásticos.....	22
2.4.2.1.2 - Fluidos dilatantes.....	22
2.4.2.1.3 - Fluido de Bingham.....	22
2.4.2.2 - Fluidos dependentes do tempo.....	23
2.4.2.2.1 - Fluidos tixotrópicos.....	24
2.4.2.2.2 - Fluidos reopéticos.....	25
2.5 - Medidas reológicas .....	25
2.5.1 - Viscosímetro de tubo capilar .....	25
2.5.2 - Sistemas rotacionais .....	26
2.5.2.1 - Viscosímetro rotacional de cilindros co-axiais.....	27
2.5.2.2 - Equações fundamentais para o viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos.....	29
2.5.2.3 - Viscosímetro rotativo de cilindro co-axiais - Brookfield.....	32
2.5.3- Viscosímetro cone- placa .....	33
2.6 - Reologia de sucos e purês de frutas .....	34
2.6.1 - Estudos reológicos de sucos de frutas .....	34
2.6.2 - Estudos reológicos de purês de frutas.....	37
2.7 - Modelos reológicos .....	38
2.7.1 - Modelo de Ostwald-de-Waele.....	39
2.7.2 - Modelos que consideram a tensão inicial.....	40
2.7.2.1 - Modelo de Bingham.....	40
2.7.2.2 - Modelo de Herschel-Bulkley.....	41
2.7.2.3 - Modelo de Casson.....	42
2.7.2.4 - Modelo de Mizrahi-Berk.....	43
2.8 - Influência da temperatura e da concentração na viscosidade	43

2.8.1 - Influência da concentração .....	45
2.8.2 - Influência da temperatura .....	46
<b>CAPITULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
3.1 - Matéria - prima .....	48
3.1.1 - Seleção.....	49
3.1.2 - Lavagem.....	49
3.1.3 - Despulpamento.....	49
3.1.4 - Acondicionamento.....	49
3.1.5 - Congelamento e armazenamento.....	50
3.2 - Caracterização química e fisico-química do material .....	50
3.2.1 - Acidez total titulável.....	50
3.2.2 - Açúcares redutores, não redutores e totais.....	50
3.2.3 - Sólidos solúveis (°Brix).....	51
3.2.4 - Cinzas.....	51
3.2.5 - pH.....	51
3.2.6 - Pectina.....	51
3.2.7 - Sólidos solúveis e insolúveis.....	52
3.2.8 - Sólidos totais e umidade.....	52
3.3 - Preparo do material .....	52
3.3.1 - Material integral.....	52
3.3.2 - Material peneirado.....	53
3.3.3 - Material a 9 °Brix.....	53
3.4 - Estudo reológico .....	53
3.4.1 - Conversão dos dados experimentais.....	55
3.4.1.1 - Tensão de cisalhamento .....	55
3.4.1.2 - Índice de comportamento de fluxo.....	56
3.4.1.3 - Taxa de deformação.....	57

3.4.1.4 - Viscosidade aparente.....	57
3.5 - Análise matemática .....	58
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1 - Caracterização química e físico-química da matéria- prima.....	59
4.2 - Estudo reológico .....	62
4.2.1 - Modelo de Casson .....	62
4.2.2 - Modelo de Ostwald-de-Waelle .....	67
4.2.3 - Modelo de Herschel-Bulkley .....	71
4.3 - Viscosidade aparente .....	77
4.3.1 - Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente ...	80
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....	85
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87
CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES .....	98
APÊNDICE A .....	100
APÊNDICE B .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Fluxograma dos principais produtos que podem ser obtidos do cupuaçu (VENTURIERI, 1993) .....	07
<b>Figura 2.2</b> - Frutos do cupuaçueiro mostrando a casca e as sementes com polpa .....	08
<b>Figura 2.3</b> - Frutos no cupuaçueiro .....	08
<b>Figura 2.4</b> - Classificação geral do comportamento reológico.....	18
<b>Figura 2.5</b> - Comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação .....	20
<b>Figura 2.6</b> - Curvas de escoamento para vários fluidos independentes de tempo .....	21
<b>Figura 2.7</b> - Curvas de escoamento para fluidos dependentes de tempo.....	24
<b>Figura 2.8</b> - Sistema Couette .....	28
<b>Figura 2.9</b> - Sistema Searle .....	28
<b>Figura 3.1</b> - Fluxograma para obtenção da polpa integral do cupuaçu .....	48

<b>Figura 3.2</b> – Equipamentos utilizados nas medidas reológicas: viscosímetro e banho-maria .....	54
<b>Figura 3.3</b> - Viscosímetro Brookfield - RVT com conjunto de spindles .....	54
<b>Figura 4.1</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu a 9°Brix descrita pelo modelo de Casson .....	65
<b>Figura 4.2</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu peneirada, descrita pelo modelo de Casson .....	65
<b>Figura 4.3</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu integral, descrita pelo modelo de Casson .....	66
<b>Figura 4.4</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu a 9°Brix, descrita pelo modelo Ostwald-de-Waele .....	69
<b>Figura 4.5</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu peneirada, descrita pelo modelo de Ostwald-de - Waele .....	70

<b>Figura 4.6</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu integral, descrita pelo modelo Ostwald-de-Waele .....	70
<b>Figura 4.7</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para polpa do cupuaçu a 9°Brix, descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley .....	74
<b>Figura 4.8</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu integral, descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley .....	74
<b>Figura 4.9</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa do cupuaçu peneirada, descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley .....	75
<b>Figura 4.10</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os materiais 9°Brix, peneirado e integral, a 10°C. Ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley .....	76
<b>Figura 4.11</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os materiais 9°Brix, peneirado e integral, a 20°C. Ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley .....	76
<b>Figura 4.12</b> - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os materiais 9°Brix, peneirado e integral, a 30°C. Ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley .....	77

<b>Figura 4.13</b> - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade para a polpa de cupuaçu a 9°Brix .....	78
<b>Figura 4.14</b> - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade para a polpa de cupuaçu peneirada .....	79
<b>Figura 4.15</b> - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade para a polpa de cupuaçu integral.....	79
<b>Figura 4.16</b> - Viscosidade aparente da polpa de cupuaçu em função da temperatura .....	82
<b>Figura 4.17</b> - Viscosidade aparente da polpa de cupuaçu, calculada para a taxa de deformação $20s^{-1}$ em função da temperatura, ajustada com a equação de Arrhenius .....	84

## ÍNDICE DAS TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Principais constituintes químicos do cupuaçu (por 100g de polpa) .....	06
<b>Tabela 2.2</b> - Relação sólidos solúveis/acidez em frutos com diferentes estágios de maturação .....	14
<b>Tabela 3.1</b> - Fatores de conversão para os spindles do viscosímetro Brookfield - RVT.....	56
<b>Tabela 4.1</b> - Caracterização química e físico-química da polpa integral do cupuaçu .....	59
<b>Tabela 4.2</b> - Padrões de identidade e qualidade fixados para a polpa do cupuaçu .....	60
<b>Tabela 4.3</b> - Composição química da polpa integral do cupuaçu .....	61
<b>Tabela 4.4</b> - Valores da caracterização físico-química das diferentes amostras da polpa de cupuaçu.....	61
<b>Tabela 4.5</b> - Parâmetros do modelo de Casson para a polpa de cupuaçu nas diferentes amostras estudadas.....	63
<b>Tabela 4.6</b> - Parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waele para a polpa de cupuaçu nas diferentes condições estudadas .....	67

<b>Tabela 4.7</b> - Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu nas diferentes condições estudadas.....	71
<b>Tabela 4.8</b> - Valores da viscosidade aparente calculados para a taxa de deformação $20s^{-1}$ a partir dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu a $9^{\circ}$ Brix, peneirada e integral .....	81
<b>Tabela 4.9</b> - Parâmetros da equação de Arrhenius para a polpa de cupuaçu à $9^{\circ}$ Brix, peneirada e integral .....	83

## NOMENCLATURA

- $E_a$  Energia de ativação para escoamentos viscosos ( kcal/gmol)
- $H$  Altura equivalente de imersão (m)
- $K$  Constante da mola
- $K_H$  Índice de consistência de Herschel-Bulkley (Pa.s<sup>n</sup>)
- $K_{oc}$  Tensão inicial de Casson (Pa.s)<sup>0.5</sup>
- $K_c$  Viscosidade plástica de Casson (Pa.s)<sup>0.5</sup>
- $K_{OM}$  Raiz quadrada da tensão inicial de Mizrahi-Berk (Pa)<sup>1/2</sup>
- $K_M$  Índice de consistência de Mizrahi-Berk (Pa.s<sup>n</sup>)
- $K$  Índice de consistência de Ostwald-de-Waele (Pa.s<sup>n</sup>)
- $K_{ny}$  Fator que é função do índice do fluxo e do spindle utilizado
- $K_{at}$  Fator que corresponde ao spindle utilizado (adimensional)
- $N$  Número de rotações por minuto (rpm)
- $n_H$  Índice de comportamento de fluxo de Herschel-Bulkley (adimensional)
- $n_M$  Índice de comportamento de fluxo de Mizrahi-Berk (adimensional)
- $N_1$  Velocidade de rotação (rpm )
- $n$  Índice de comportamento de fluxo (adimensional)
- $R_2$  Raio do cilindro externo (m)
- $R_1$  Raio do cilindro interno (m)
- $R$  Constante universal dos gases (1.987 cal/gmolK)
- $R_c$  Raio externo do cone

**T<sub>q</sub>** Torque a ser medido

**T** Temperatura absoluta (K)

### **Letras Gregas**

$\tau_{0H}$  Tensão inicial de Herschel-Bulkley (Pa)

$\theta$  Deflexão lida no dial ou monitor digital

$\tau$  Tensão cisalhante no cone

$\gamma_c$  Taxa de deformação

$\omega$  Velocidade angular

$\alpha$  Ângulo do cone

$\tau$  Tensão de cisalhamento (Pa)

$\gamma$  Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\eta_\infty$  Constante ( Pa.s)

$\alpha_1$  Leitura do torque

$\eta$  Viscosidade absoluta (Pa s)

$\eta_a$  Viscosidade aparente (Pa.s)

$\tau_0$  Tensão inicial de Bingham

$\eta_p$  Viscosidade plástica de Bingham

$\tau_b$  Tensão cisalhante na parede do cilindro interno

Dissertação de Mestrado: Comportamento reológico da polpa do cupuaçu  
(*Theobroma grandiflorum* Schum.)

Autora: Maria Fábria Pereira Cabral.

Orientadores: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz  
Prof.<sup>a</sup> Dra. Rossana M. Feitosa de Figueirêdo.

Departamento de Engenharia Agrícola- DEAg. UFPB

### RESUMO

Estudou-se o comportamento reológico de polpas de cupuaçu previamente caracterizadas quanto à composição química e físico-química (açúcares totais, redutores, °Brix, sólidos totais, acidez, ácido ascórbico, cinzas e pectina) com três teores de sólidos, as quais foram classificadas segundo esses teores em integral, peneirada e 9° Brix. Todas as amostras foram estudadas nas temperaturas de 10, 15, 20 25 e 30°C e as aferições reométricas foram obtidas com um viscosímetro de marca Brookfield, modelo RVT, com geometria de cilindros concêntricos. Os dados experimentais foram ajustados através dos modelos reológicos de Ostwald-de-Waelle, Casson e Herschel-Bulkley Sendo obtido o melhor ajuste por meio deste último. Todas as amostras apresentaram comportamento não-newtoniano e pseudoplástico. Os valores de viscosidade aparente calculados à uma taxa de deformação fixa de  $20s^{-1}$  variaram de 1,8842 (Pa.s) a 1,5783 (Pa.s) para o material a 9° Brix, de 3,2978 (Pa.s) a 2,5108 (Pa.s) para o material peneirado e de 3,5453 a 3,0154 para o material integral. A dependência da viscosidade aparente, à uma taxa de deformação fixa, com a temperatura, pôde ser adequadamente descrita por uma equação do tipo Arrhenius.

---

Palavras-chave: reologia, temperatura, polpa, cupuaçu

## Rheological behavior of cupuaçu pulp (*Theobroma grandiflorum* Schum.)

Author: **Maria Fábila Pereira Cabral.**

Supervisors: **Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz**  
**Prof.<sup>a</sup> Dra. Rossana M. Feitosa de Figueirêdo**

**Department of Agricultural Engineering - DEAg. UFPB**

### ABSTRACT

The rheological behavior of the cupuaçu pulp was studied. The cupuaçu pulps were previously characterized about the chemistry and physical-chemistry composition (total sugar, reducers, °Brix, total solids, acidity, ascorbic acid, ash and pectin) with three solids rates, which were classified in integral, sieved and 9° Brix according to these rates. All the samples were studied at the temperatures of 10, 15, 20, 25 and 30° C and the rheometric data were obtained with a viscosimeter of Brookfield mark, RVT model, that has concentric cylinders geometry. The experimental data were adjusted through Ostwald-de-Waele, Casson and Herschel-Bulkley's rheological models. The best fit was obtained through the last one. All the samples presented non-newtonian and pseudoplastic behaviors. The values of apparent viscosity, which are calculated at a fixed shear rate of  $20\text{s}^{-1}$ , varied from 1.8842 (Pa.s) to 1.5783 (Pa.s) for the sample at 9° Brix, from 3.2978 (Pa.s) to 2.5108 (Pa.s) for the sieved sample and from 3.5453 (Pa.s) to 3.0154 (Pa.s) for the integral sample. The dependence of the apparent viscosity at a fixed shear rate, with the temperature, could be suitably described by equation of the Arrhenius type.

---

Key words: rheology, temperature, pulp, cupuaçu

---

## 1 - INTRODUÇÃO

Os diferentes solos e climas brasileiros, a luminosidade intensa e a abundância de água proporcionam colheitas de frutas com alto índice de produtividade e excelência de qualidade. As vantagens naturais conjugadas às técnicas modernas de irrigação e manejo de culturas, permitem a produção em praticamente qualquer época do ano, independente da estação, conferindo ao Brasil uma grande capacidade para a produção de frutas frescas. Além de possibilitar a exploração do grande potencial do mercado de frutas na forma de sucos e polpas, incorporando maior valor agregado e reduzindo as perdas.

A demanda mais exigente e o aumento da concorrência devido a internacionalização dos mercados, levou a crescente necessidade do conhecimento das propriedades físicas dos diversos fluidos alimentícios pela indústria, visando adequar suas instalações ou projetar novas unidades de processamento para que as frutas cheguem ao mercado não mais na forma "in natura", mas na forma de sucos e polpas com maior qualidade e economia.

No Brasil há escassez de dados sobre propriedades reológicas dos sucos, polpas e outros derivados de frutas nacionais. A matéria-prima brasileira apresenta características diferentes daquela produzida em outras partes do mundo, principalmente no que diz respeito aos teores de polpa e açúcares que irão influenciar diretamente no teor de sólidos solúveis e insolúveis e consequentemente na viscosidade (VIDAL, 1997).

Frutas tropicais de sabor e aroma exóticos, apreciadas e consumidas pelas populações nativas das regiões onde são produzidas, tem sido objeto de pouco ou nenhum estudo visando a disponibilização de dados acerca do

---

comportamento reológico de seus derivados, como é o caso do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). VENTURIERI (1993) reporta que apesar dos indícios promissores para a exportação do cupuaçu, um dos principais problemas é a falta de indústrias de processamento dentro dos padrões de qualidade exigidos pelo mercado exterior. A inexistência desses dados constitui-se em dificuldades para adaptação de tais derivados às estruturas processadoras existentes, uma vez que a maioria dos projetos de equipamentos utilizados no processamento de frutas são baseados em estimativas dos parâmetros reológicos determinados no exterior (VIDAL, 1997).

O conhecimento do comportamento reológico de sucos e polpas e frutas nacionais é útil não apenas no controle de qualidade do produto, essas informações permitem o cálculo prático para situações importantes, como: projetos de tubulações e bombas, sistemas de agitação e mistura, estocagem, concentração, resfriamento, etc.

É importante para a engenharia, uma criteriosa caracterização reológica dos sucos e polpas de frutas tropicais, considerando a influência de inúmeros fatores que podem afetar as propriedades de escoamento, tais como, variedade, grau de maturação, concentração e temperatura.

## 1.1 - Objetivo

Este trabalho teve como objetivo a determinação experimental do comportamento reológico da polpa de cupuaçu em três condições: integral, com redução no teor de particulado insolúvel (peneirada) e com redução no teor de sólidos solúveis (9°Brix). As determinações foram realizadas às temperaturas de 10, 15, 20, 25 e 30°C. Os dados experimentais foram descritos pelos modelos de Casson, Herschel-Bulkley e Ostwald-de-Waele ( Lei da Potência).

---

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - O cupuaçu

O cupuaçueiro (*Theobroma grandiflorum* Schum.) é uma espécie perene da família *Sterculiaceae* encontrada nas áreas de mata do sul e nordeste da Amazônia Oriental e nordeste do Maranhão. A espécie atualmente está disseminada em toda bacia amazônica brasileira e países vizinhos.

A árvore tem altura média de 6 a 10 m, podendo ocorrer até 20 m, e diâmetro de copa em torno de 4 a 7 m. O fruto possui uma forma oblonga, podendo também ser arredondado. Seu comprimento varia de 15 a 25 cm e o seu diâmetro de 10 a 12 cm com o peso variando de 500 a 3.000g. O cupuaçu é o maior dentre os frutos do gênero *Theobroma*, e sua demanda é crescente graças ao sabor agradável de sua polpa que chega a constituir cerca de 35 a 40% do peso do fruto e é consumida na forma de sucos, doces, sorvetes, iogurtes, licores, néctares e outros derivados. As sementes podem substituir as do cacau na fabricação do chocolate caseiro, conhecido popularmente como "cupulate" (MULLER & FIGUEIRÊDO, 1995).

O cupuaçueiro tem sua produtividade limitada pela baixa fertilidade natural dos solos da Amazônia, havendo a necessidade de um conhecimento maior para permitir um manejo mais produtivo da cultura. Na região amazônica, o fruto é um dos mais importantes componentes da renda de pequenos produtores rurais e apresenta um grande potencial de exploração pelas suas qualidades organolépticas, diversidade de utilização e dentre as frutas regionais, tem o maior valor comercial (CALZAVARA *et al.*, 1984; SOUZA *et al.*, 1998).

---

De acordo com SOUZA *et al.* (1998), a produção anual de cupuaçu no estado do Amazonas é ainda muito pequena, cerca de 7.982 milhões de frutos (3.702 frutos/ha) no ano de 1995-1996, para uma área de 2.156 ha, seu cultivo é feito principalmente por pequenos produtores, sendo que até o início dos anos 80, o plantio se restringia aos pomares caseiros. Mas, atualmente já são encontrados plantios maiores, em monocultivo ou consorciado com outras espécies de fruteiras em sistemas agroflorestais.

Existe uma cultivar de cupuaçu que produz frutos sem sementes a qual apresenta um excelente rendimento de polpa, 67,35% contra 36,79% do cupuaçu com semente, sua polpa é menos ácida e produz, em média, frutos uma vez e meia mais pesados que os cupuaçus com semente (SANTOS & CONDURU, 1972).

O processo de extração da polpa pode ser feito manual ou mecanicamente. O mercado prefere a polpa beneficiada manualmente, já que a extraída por processo mecanizado normalmente é liqüefeita, o que a torna inadequada para a fabricação de certos tipos de doces (MÜLLER & FIGUEIRÊDO, 1995).

NAZARÉ *et al.* (1990) trabalharam com as sementes do cupuaçu para extração da manteiga de cupuaçu e fabricação de tabletes de cupulate branco, meio amargo e com leite obtendo características organolépticas e nutricionais semelhantes ao chocolate. A taxa de rendimento para cada produto feito das sementes processadas foi respectivamente 74,8%, 81,3% e 90,9%.

BERBERT (1981) comparando a gordura do cupuaçu com a de cacau, concluiu que a primeira é bem mais macia. Esta característica coloca a gordura do cupuaçu como grande potencial para ser usada nas indústrias de margarinas e cosméticos.

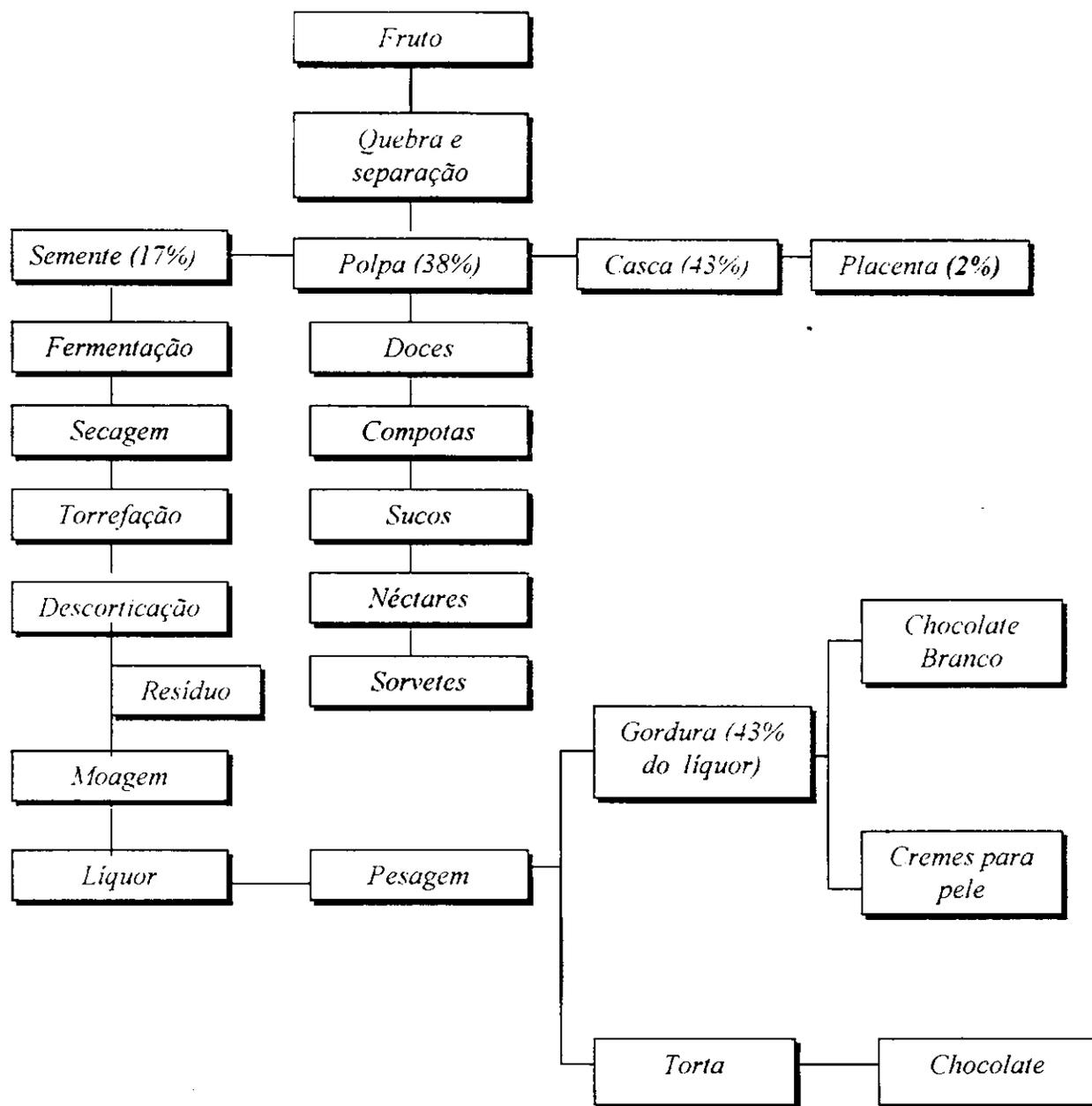
BARBOSA *et al.* (1978) determinaram os principais constituintes químicos do cupuaçu (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1** - Principais constituintes químicos do cupuaçu (por 100g de polpa)

<i>COMPONENTES</i>	<i>VALOR</i>
<i>Calorias</i>	72
<i>Umidade</i>	81,1 a 83,2%
<i>°Brix</i>	12,6 a 14,4%
<i>pH</i>	2,9 a 3,2
<i>Acidez titulável (% de ácido cítrico)</i>	1,9 a 2,8
<i>Vitamina C</i>	23,12mg
<i>Pectina</i>	0,39%
<i>Voláteis</i>	89,0%
<i>Açúcares redutores</i>	3,03%
<i>Sólidos totais</i>	11%

Fonte: BARBOSA *et al.* (1978)

VENTURIERI (1993), apresenta um fluxograma onde sumariza os produtos que podem ser obtidos do cupuaçu (Figura 2.1).



**Figura 2.1** - Fluxograma dos principais produtos que podem ser obtidos do cupuaçu (VENTURIERI, 1993).



**Figura 2.2-** Frutos do cupuaçu mostrando a casca e as sementes com polpa



**Figura 2.3 -** Frutos no cupuaçu

## 2.2 – Polpa de fruta

CABRAL & FURTADO (1997) definem polpa de fruta como o produto obtido pelo esmagamento da parte carnosas comestível da fruta por processos tecnológicos adequados.

Embora seja um produto processado, a maior aplicação da polpa é como matéria-prima para outras indústrias. O transporte, manuseio e armazenamento das frutas “in natura” além de serem onerosos, por vezes tornam-se inviáveis, dependendo das condições climáticas, da distância da perecibilidade e das características de cada fruta (SOLER *et al.*, 1988).

Polpas de frutas juntamente com frutas e vegetais são uma perfeita fonte de substâncias biologicamente ativas, tais como: vitamina C, B1, B2, B6,  $\beta$ -caroteno, minerais (potássio, magnésio e cálcio), fibras solúveis e insolúveis. Essas substâncias ajudam o homem manter a saúde, prevenir câncer e doenças degenerativas (ZADERNOWSKI *et al.*, 1997).

## 2.3 - Características químicas e físico-químicas

CHITARRA & CHITARRA (1990) afirmam que os dados sobre a composição química dos frutos são bastante variáveis, em decorrência de numerosos fatores de influência: diferença de cultivares, grau de maturidade, estação de colheita, local e clima de produção.

### 2.3.1 - pH

O pH é um dos fatores que exerce maior efeito seletivo sobre a microbiota capaz de desenvolver-se em frutas e produtos derivados (JAY, 1992).

CHAVES (1993) afirma que fatores como: influência na palatabilidade, desenvolvimentos de microrganismos, escolha da temperatura de esterilização, da embalagem que será utilizada para o alimento, do tipo de material de limpeza e desinfecção, de aditivos e vários outros, tornam importante a determinação do pH.

Para FAZIER & WESTHOFF (1993), o pH não afeta unicamente a velocidade do crescimento dos microrganismos, mas também o grau de sobrevivência durante o armazenamento, tratamento térmico ou qualquer outro sistema de conservação.

De acordo com TORREZAN (1997), o pH é um fator determinante da intensidade do tratamento a ser empregado para alcançar-se a esterilidade comercial do produto embalado. A maioria das frutas são ácidas ou podem ser acidificadas, de tal forma que o pH esteja abaixo de 4,5 e assim permita que o tratamento térmico a ser empregado seja brando (abaixo de 100°C, pasteurização).

O pH é um dos fatores que influencia a viscosidade dos alimentos, principalmente em produtos que contém espessantes. Com o abaixamento do pH, muitos desses compostos sofrem hidrólise, o que ocasiona o desempenho inadequado do aditivo em relação a viscosidade (GONÇALVES, 1989).

---

De acordo com as análises feita por BARBOSA *et al.* (1978), CHAAR (1980) e OLIVEIRA (1981), o cupuaçu apresenta em média um pH próximo a 4,5, sendo classificado como fruto meio ácido.

### 2.3.2 – Vitamina C

Cerca de 90% das necessidades de vitamina C do homem, advêm de frutos e hortaliças. Os frutos cítricos são considerados entre as melhores fontes, não só pelo teor dessa vitamina (50 a 75mg/100ml de suco) como pelo seu elevado consumo, nas dietas, no mundo inteiro (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

Bauernfeind citado por CZYHRINCIW (1969), relatou que pH elevado, oxigênio e calor podem destruir facilmente a vitamina C, e que a mesma está em pH baixo e médio.

A oxidação, aeróbia ou anaeróbia é citada por BRASIL & GUIMARÃES (1998) como sendo a principal causa da degradação da vitamina C, ambas levam a formação de furaldeídos, compostos que polimerizam facilmente, formando pigmentos escuros. Em geral, as maiores perdas da vitamina C ocorrem em produtos cítricos durante tratamento térmico (TANNENBAUM *et al.*,1993).

### 2.3.3 – Acidez titulável

BLEINROTH (1988) comenta que o teor de acidez total tende a aumentar com o decorrer do crescimento da fruta, até o seu completo desenvolvimento fisiológico, e começa a decrescer com o amadurecimento.

Dentre os numerosos compostos ácidos existentes, os mais abundantes em frutos são o cítrico e o málico, havendo predominância de acordo com a espécie (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

Segundo KEFFORD & CHANDLER (1970) a aceitabilidade de frutos cítricos e seus sucos pelo consumidor tem como principal fator o sabor azedo (acidez). Assim, laranjas com acidez de aproximadamente 1,0% e pH 3,5 são geralmente bem aceitas e limões notadamente azedos (acidez 5,0 a 6,0% e pH 2,2) tem preferência pelo consumidor.

BARBOSA *et al.* (1978) e CHAAR (1980) afirmaram que a polpa do cupuaçu possui elevada acidez (2,15%). Essa acidez natural aliada a pectina favorecem a fabricação de néctares, geléias, e outros doces pastosos. Pesquisas realizados por estes mesmos autores demonstram que a acidez natural da polpa é suficiente para manter a qualidade do néctar durante o armazenamento.

### 2.3.4 – Sólidos solúveis ( °Brix )

À medida que as frutas vão amadurecendo, o amido é hidrolisado em açúcares complexos e estes são transformados em açúcares simples. Conseqüentemente com a maturação da fruta o seu teor de sólidos solúveis vão aumentando. Portanto, os sólidos solúveis podem ser considerados como índice de maturação da fruta (BLEINROTH, 1988).

\*ADORNO (1997) estudando o comportamento reológico do suco de manga, observou que o aumento do conteúdo de sólidos solúveis, provocam o aumento do índice de consistência.

VIEIRA (1995) e IBARZ *et al.* (1994) trabalhando com suco de laranja afirmaram que os sólidos solúveis exercem efeito notável sobre os parâmetros reológicos desse suco.

RODRIGUES *et al.* (1977) afirmam que o valor dos sólidos solúveis nos frutos é importante, uma vez que quanto maior a quantidade de sólidos solúveis existentes, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionada na indústria quando os frutos são processados, diminuindo o custo de produção e aumentando a qualidade do produto.

Na Tabela 2.2 são apresentados valores para acidez, sólidos solúveis e a relação entre os mesmos, para alguns frutos, em diferentes estádios de maturação.

**Tabela 2.2** - Relação sólidos solúveis/acidez em frutos em diferentes estádios de maturação.

<b>FRUTO</b>	<b>SS (%)</b>	<b>AT(%)</b>	<b>SS/AT</b>
<i>Ameixa (cv. RainhaCláudia)</i>			
<i>Verde</i>	6,55	1,69	4,4
<i>De vez</i>	8,88	1,77	5,1
<i>Madura</i>	11,60	1,35	8,7
<i>Banana (cv. Prata)</i>			
<i>Verde</i>	1,5	0,14	10,9
<i>De vez</i>	8,2	0,26	31,7
<i>Madura</i>	20,3	0,44	95,9
<i>Laranja (cv. Pera Rio)</i>			
<i>Verde</i>	8,60	2,03	4,2
<i>De vez</i>	10,35	1,44	7,5
<i>Madura</i>	11,37	0,99	11,4
<i>Goiaba (cv. LAC-4)</i>			
<i>Verde</i>	4,53	0,29	16,0
<i>De vez</i>	5,58	0,27	21,7
<i>Madura</i>	6,80	0,25	26,8
<i>Maçã (cv. Meirose)</i>			
<i>Verde</i>	3,75	0,30	13,7
<i>De vez</i>	8,42	0,45	18,3
<i>Madura</i>	8,88	0,35	26,5

Fonte: CHITARRA & CHITARRA (1990).

### 2.3.5 – Pectina

CHITARRA & CHITARRA (1990) referem-se às substâncias pécicas como os principais componentes químicos dos tecidos, responsáveis pelas mudanças de textura dos frutos e hortaliças. Relatam, também, que os frutos e hortaliças destinados ao processamento, devem ser firmes o suficiente para suportar os tratamentos térmicos. esclarecem que a firmeza está diretamente relacionada ao conteúdo e tipo de pectina presente. Como exemplo, cita os pêssegos de semente presa (clingstone) que são preferidos para a

---

industrialização (fabricação de compotas), porque além da coloração amarela da polpa, também apresentam pequeno percentual de solubilização das pectinas e as cultivares de semente solta (freestone) têm elevado percentual de solubilização, o que caracteriza a maciez desses frutos, preferidos para o consumo “in natura”.

NAGY *et al.* (1993) afirmaram que a presença de substâncias pécticas, aumentam a viscosidade, levando à dificuldades na clarificação e concentração dos sucos.

HOLDSWORTH (1971) trabalhando com suco de maçã, observou que o suco despectinizado, apresenta comportamento newtoniano, enquanto que o suco turvo mostra comportamento não-newtoniano e pseudoplástico. Com isso afirmou que o conteúdo de pectina em sucos e purês de frutas parece ser o principal responsável pelas características não-newtonianas, incluindo efeitos de dependência-tempo.

SARAVACOS (1970) relatou que suco de maçã quando despectinizado comporta-se como fluido newtoniano para as concentrações de 10° a 80°Brix, na faixa de 20 a 70°C.

BARBOSA *et al.* (1978) e CHAAR (1980) afirmaram que a quantidade de pectina do cupuaçu é comparável a da maçã (cupuaçu = 390 a 850 mg/100g; maçã = 709 mg/100g) que é usada na preparação industrial da pectina.

### 2.3.5 - Umidade

A umidade no alimento está relacionada com a quantidade de água disponível existente no produto.

Sob temperatura adequada e dentro da atividade aquosa indicada, os microrganismos crescem mais rapidamente. A atividade de água abaixo de 0,70, impossibilita o crescimento de microrganismos, por isso a sua diminuição é um recurso empregado na conservação de alimentos (EVANGELISTA, 1994).

Quando um produto é aquecido em condições que permitem a remoção da água, ocorrerá perda de peso, a qual corresponde a umidade do produto. O resíduo obtido no aquecimento direto é chamado de resíduo seco (LARA *et al.* 1976).

Avaliando a composição físico-química e química da polpa integral do cupuaçu, BARBOSA *et al.* (1978), encontraram valores para a umidade em torno de 89%.

## 2.4 – Reologia

Reologia é uma palavra de origem grega que vai buscar significado nos vocábulos, rheo – deformação e logia – ciência ou estudo. Portanto, reologia é a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoia, quando submetida a esforços produzidos por forças externas (MACHADO, 1996).

---

GASPARETTO & GEHRKE (1995) definem reologia como o estudo do escoamento de fluidos, ou seja, o estudo da resposta interna dos materiais quando submetidos à ação de forças externas.

É a ciência que estuda a relação entre a deformação do fluido devido a força nele aplicada (GONÇALVES, 1989). O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos newtonianos até a elasticidade de Hooke (BIRD, 1960).

MORI (1989) afirma que a textura, atributo importante de qualidade, pode ser considerada como uma manifestação das propriedades reológicas de um alimento.

Os fluidos em geral são classificados em função do seu comportamento reológico. Este envolve a determinação e a análise da relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, que é chamado taxa de deformação, para uma determinada condição de temperatura e pressão. De uma maneira abrangente os fluidos podem ser classificados como: newtonianos e não-newtonianos (MACHADO, 1996).

A Figura 2.4 apresenta um fluxograma para a classificação geral dos fluidos

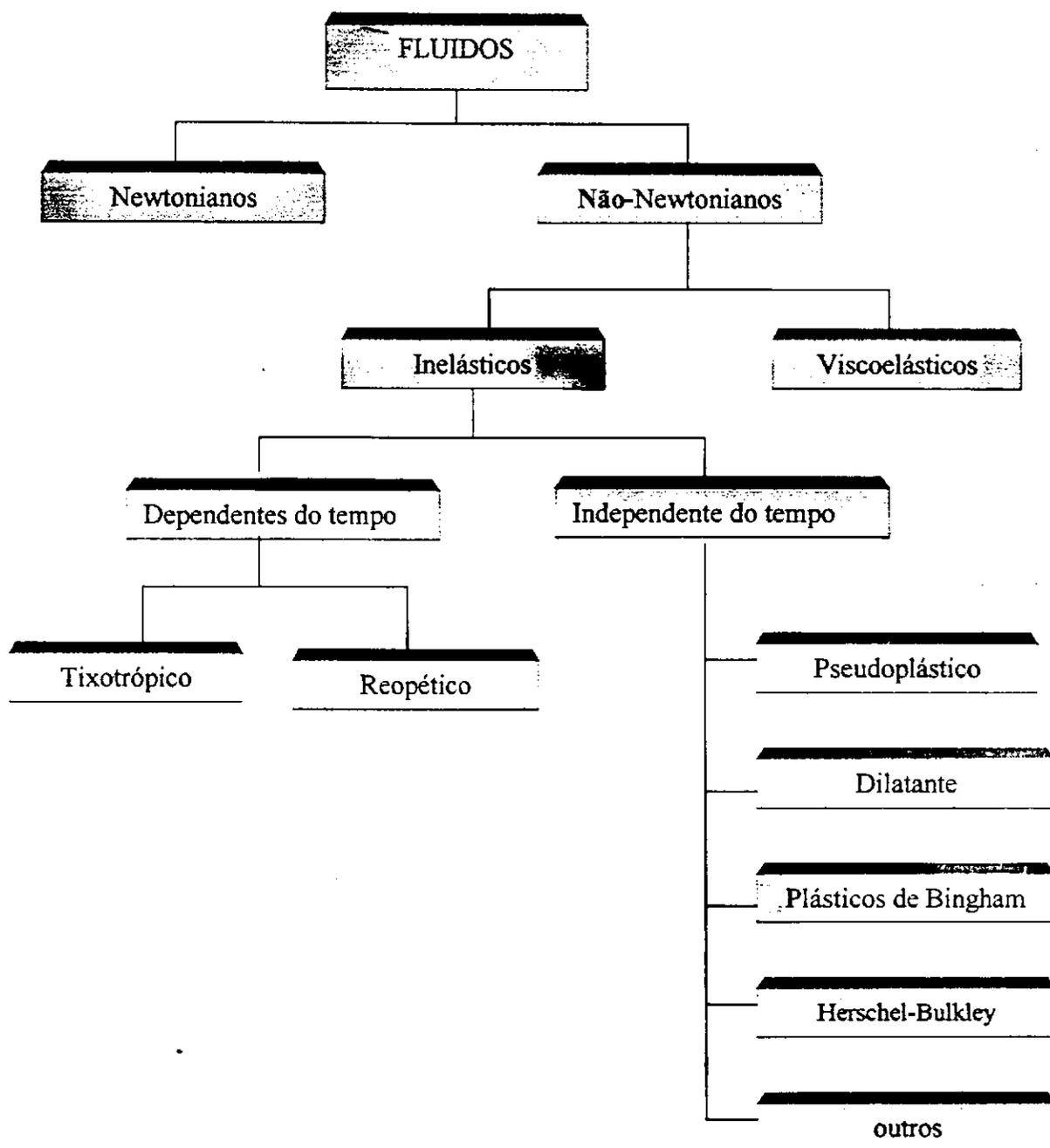


Figura 2.4. Classificação geral do comportamento reológico

### 2.4.1. Fluidos newtonianos

Os fluidos são newtonianos quando obedecem ao postulado de Newton. De acordo com GONÇALVES (1989), estes fluidos apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, ou seja, a viscosidade é constante (Figura 2.5). Portanto, os fluidos newtonianos têm um comportamento característico onde a viscosidade não depende da taxa de deformação. Alguns produtos alimentícios que apresentam esse tipo de comportamento são: leite, café, cerveja, vinho, óleo, mel e sucos clarificados de maçã e uva.

Matematicamente os fluidos newtonianos são definidos pela Equação 2.1:

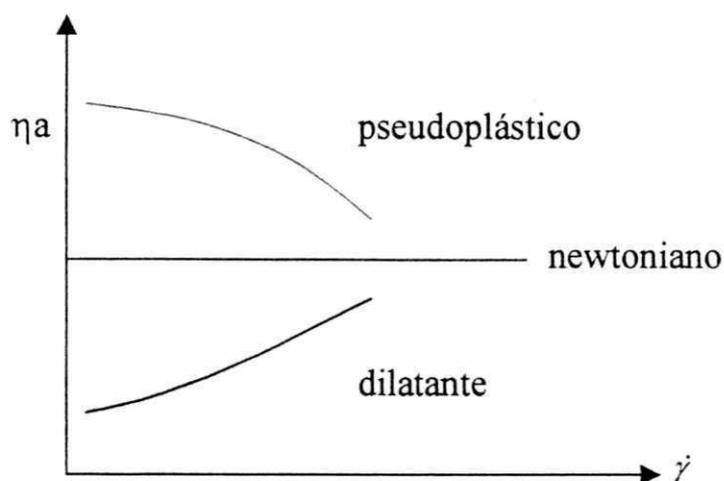
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\eta$  = Viscosidade absoluta (Pa.s)



**Figura 2.5** - Comportamento da viscosidade aparente em função da taxa de deformação

#### 2.4.2 – Fluidos não-newtonianos

São aqueles cuja relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação não é constante e sua viscosidade varia com a magnitude da taxa de deformação.

Qualquer fluido não-newtoniano pode ser definido pela Equação 2.2:

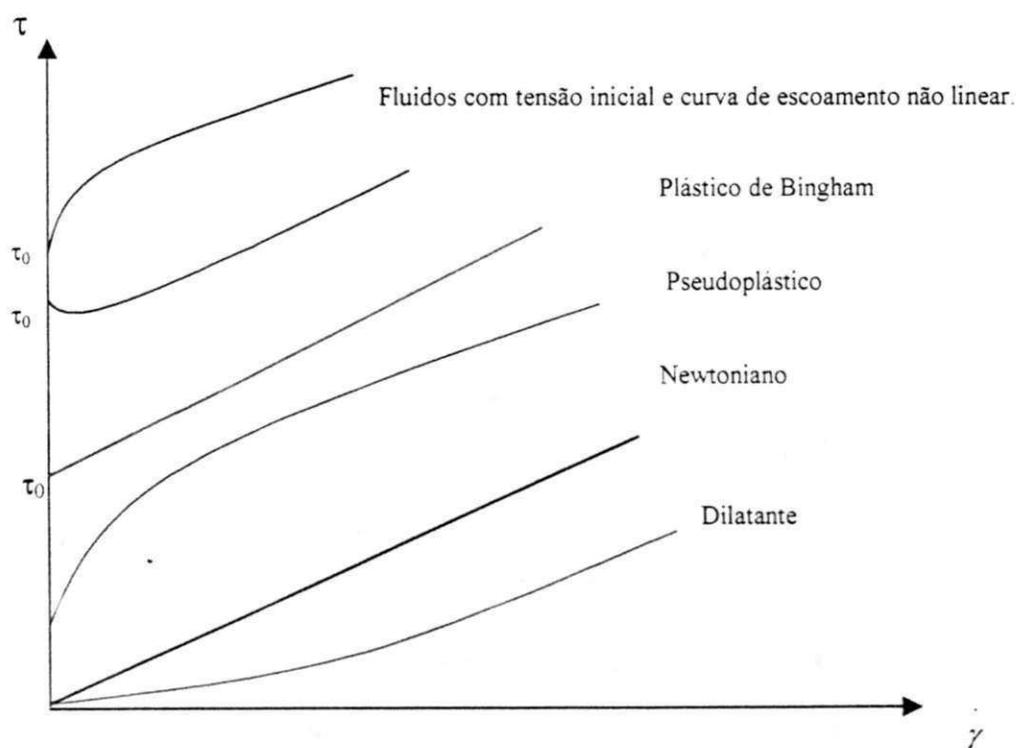
$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.2)$$

Onde a viscosidade ( $\eta_a$ ), variável como função da taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ), é denominada de viscosidade aparente.

### 2.4.2.1 – Fluidos independentes do tempo

São fluidos que a uma temperatura constante, a viscosidade aparente depende somente da taxa de deformação. Estes fluidos podem ser divididos nas categorias: pseudoplástico, dilatante e Bingham.

Na Figura 2.6 são apresentadas as curvas de escoamento de fluidos independentes do tempo.



**Figura 2.6** - Curvas de escoamento para vários tipos de fluidos independentes do tempo.

#### 2.4.2.1.1- Fluidos pseudoplásticos

vap + tan.

São fluidos onde a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação (Figura 2.5). Muitos fluidos alimentares apresentam esse tipo de comportamento, tais como, os sucos concentrados e purês de frutas.

Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento de fluxo ( $n$ ) é menor que a unidade, e quanto menor seu valor, mais intenso é o comportamento pseudoplástico (ADORNO, 1997).

#### 2.4.2.1.2 – Fluidos dilatantes

Nos fluidos dilatantes, a viscosidade aparente aumenta com o aumento da taxa de deformação (Figura 2.5). Esse tipo de comportamento foi encontrado em mel (HOLDSWORTH, 1971), amido de milho e soro de purê de tomate.

#### 2.4.2.1.3 – Fluidos de Bingham

GONÇALVES (1989) define os fluidos de Bingham, como fluidos que inicialmente necessitam de uma tensão de cisalhamento para que haja fluxo ou movimentação do material. Uma vez atingida essa tensão, o fluido passa a apresentar um comportamento newtoniano e é chamado de plástico de Bingham ou plástico ideal. Como exemplos desse comportamento têm-se: purê de batata, mostarda, chocolate fundido e creme batido.

Matematicamente os fluidos de Bingham são descritos pela Equação 2.3:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

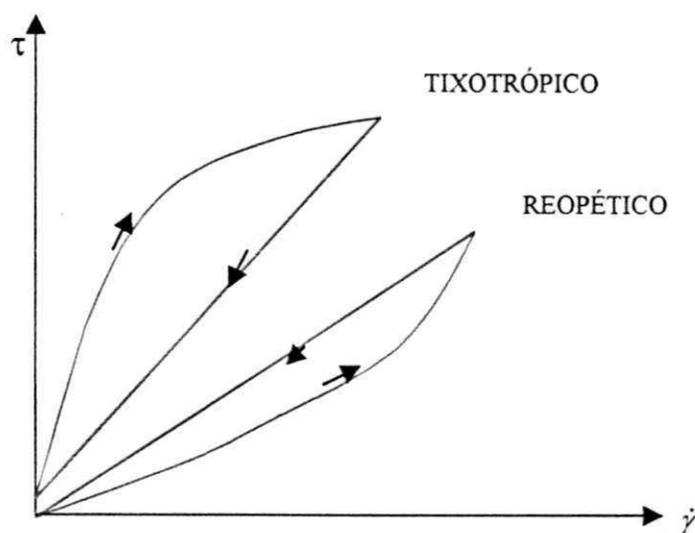
$\tau_0$  = Tensão inicial (Pa)

$\eta_p$  = Viscosidade plástica (Pa.s)

CHIAMPO *et al.* (1996) estudando o comportamento reológico de polpas de maçã, pêsego, pêra e damasco, usando diferentes modelos reológicos, observaram que a polpa de damasco e maçã são consideradas plástico de Bingham.

#### 2.4.2.2 – Fluidos dependentes do tempo

Neste tipo de fluido, a viscosidade aparente depende da taxa de deformação e da duração do cisalhamento. Estão subdivididos em duas categorias: tixotrópicos e reopéticos (Figura 2.7).



**Figura 2.7** - Curvas de escoamento para fluidos dependente do tempo.

#### 2.4.2.2.1 – Fluidos tixotrópicos

Os fluidos pertencentes a este grupo apresentam comportamento reológico dependente do tempo e a viscosidade aparente, a uma taxa de deformação fixa, decresce com o tempo, conforme comentado por GASPARETTO & GEHRKE (1995).

Suco de maçã com polpa, suco concentrado de maracujá, alguns méis de abelha, leite condensado açucarado, clara de ovo e maionese, são produtos alimentícios considerados tixotrópicos GONÇALVES (1989).

Ezell (1959) citado por HOLDSWORTH (1971), utilizando um viscosímetro rotacional Brookfield modelo LVF, verificou que os sucos concentrados comerciais de laranja a 42°Brix e a 30°C, apresentam comportamento pseudoplástico e tixotrópico.

#### **2.4.2.2.2 – Fluidos reopéticos**

Apresentam comportamento inverso aos fluidos tixotrópicos, sendo por isso conhecidos também, como fluidos de tixotropia negativa ou anti-tixotrópicos (Figura 2.7). Entretanto, são casos muito complexos e raros, notadamente na área de alimentos processados (GONÇALVES, 1989).

### **2.5 - Medidas reológicas**

Os viscosímetros são equipamentos projetados e concebidos para medir, ou determinar a partir de medições, a viscosidade ou os parâmetros viscosos dos fluidos. Os projetos dos viscosímetros mais usuais se baseiam nos diferentes tipos de fluxo permanentemente laminar, apresentando diferentes configurações, das quais, as mais comuns são:

- Sistemas capilares
- Sistemas rotacionais

#### **2.5.1 - Viscosímetro de tubo capilar**

Esse tipo de sistema consiste em forçar um líquido a escoar através de um tubo de diâmetro pequeno, empregando uma bomba de deslocamento positivo. A viscosidade do fluido é determinada a partir das medidas de vazão, pressão e dimensões do tubo.

O viscosímetro de tubo capilar é simples, exato e científico, pode ser usado no estudo de fluidos newtonianos e não-newtonianos, transparentes ou opacos. É ainda indicado no estudo de fluidos de altas viscosidades, uma vez que a sua estrutura mecânica permite operar com pressão elevada.

### **2.5.2 - Sistemas rotacionais**

Esse tipo de sistema se baseia na rotação de um corpo, interno ou externo, superior ou inferior, imerso em um líquido, o qual experimenta uma força de resistência viscosa. Esta é função da velocidade de rotação do corpo e da natureza do fluido.

Uma das vantagens dos viscosímetros rotativos sobre os capilares é que nos primeiros, a característica tixotrópica ou reopética pode ser estudada, atributo impossível nos viscosímetros capilares.

O viscosímetro rotativo é um equipamento concebido de tal modo que o corpo imerso ou em contato com o fluido-teste pode ser submetido a uma rotação ou a uma tensão ou torque pré-definida. Podem ser de dois tipos fundamentais:

- Cilindros co-axiais
- Cone-placa

### 2.5.2.1 - Viscosímetro rotacional de cilindros co-axiais

O primeiro projeto de viscosímetro de cilindros concêntricos foi idealizado por Couette em 1890. No sistema Couette um corpo externo gira a uma velocidade definida, provocando um fluxo na amostra do líquido entre os corpos interno e externo. A resistência do líquido cisalhando transmite um torque ao corpo interno, que é induzido a girar. Como o corpo interno está fixo a uma mola de torção, esta se deforma até atingir o estado de equilíbrio. Portanto, o torque é medido justamente pela determinação do contra-torque que mantém o cilindro interno estático (Figura 2.8).

No sistema idealizado por Searle, o corpo interno, gira a uma velocidade definida, e o corpo externo é mantido em repouso. O corpo interno girando, força o líquido do espaço entre os dois corpos a escoar. A resistência natural do líquido, cisalhando entre os corpos interno e externo, resulta em um torque atuando no cilindro interno, que se contrapõe ao torque do motor do equipamento. Uma mola de torção, com uma constante de deformação conhecida, é posicionada entre o motor e o corpo interno. A sua deformação resulta, portanto, em uma medida direta do torque ou da tensão cisalhante (Figura 2.9). Muitos viscosímetros rotativos são do tipo Searle.

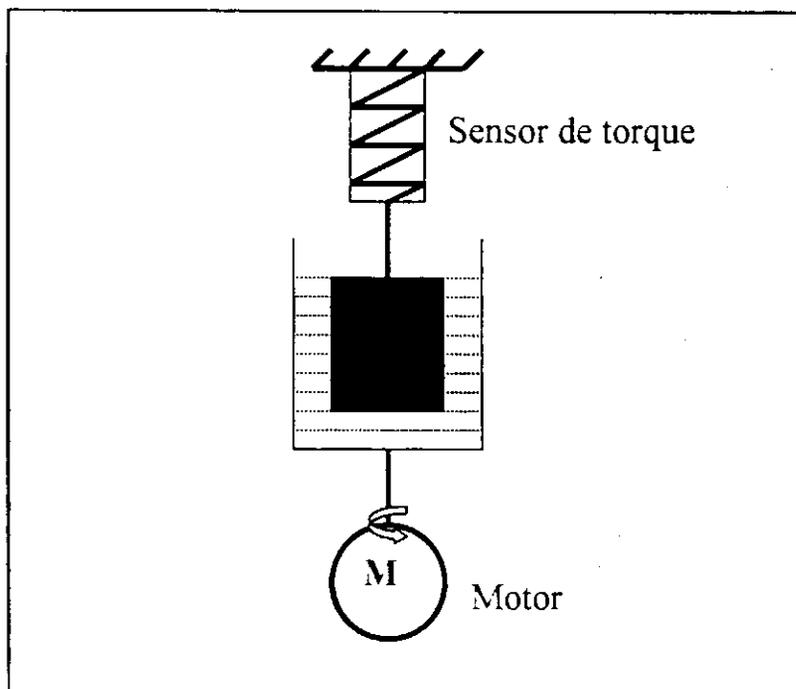


Figura 2.8 - Sistema Couette

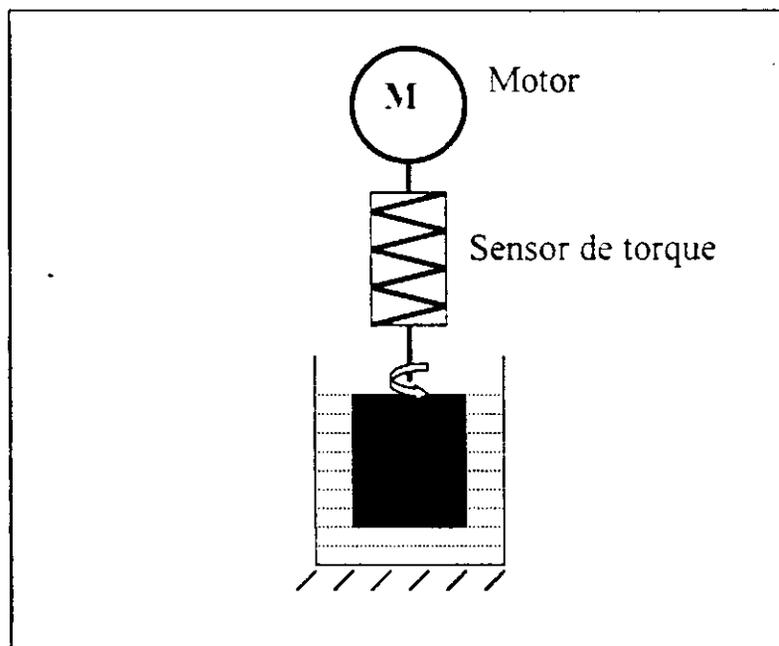


Figura 2.9 - Sistema Searle

### 2.5.2.2 - Equações fundamentais para o viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos

As equações matemáticas para o cálculo dos parâmetros reológicos do viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos são descritas por MACHADO (1996).

Os parâmetros de construção ou projeto do viscosímetro rotativo de cilindros concêntricos são o raio do cilindro interno ( $R_1$ ), o raio do cilindro externo ( $R_2$ ), a constante da mola ( $K$ ) e a velocidade de rotação ( $N$ ) em rpm. A grandeza medida diretamente pode ser a deflexão, em graus, ou o torque, em N/m, a qual é lida sobre uma escala circular (dial) ou através de um monitor digital. As grandezas calculáveis podem ser a tensão cisalhante, em N/m<sup>2</sup> (Pa), a taxa de deformação, em s<sup>-1</sup>, e a viscosidade em mPa.s (cP).

A expressão para o cálculo da tensão cisalhante, deduzida para qualquer fluido no estado estacionário ou em equilíbrio dinâmico em função da leitura de deflexão é:

$$\tau_b = \left( \frac{K}{2\pi R_1^2 H} \right) \cdot \theta \quad (2.4)$$

Onde:

$\tau_b$  = Tensão cisalhante na parede do cilindro interno (N/m<sup>2</sup>)

$K$  = Constante da mola

$R_1$  = Raio do cilindro interno (m)

$H$  = Altura equivalente de imersão (m)

$\theta$  = Deflexão lida no dial ou monitor digital (°)

Considerando que todos os parâmetros entre parênteses na Equação 2.4 são constantes quando o projeto do viscosímetro está definido, então pode-se escrever:

$$\tau_b = A_1 \cdot \theta \quad (2.5)$$

Onde  $A_1$  é uma constante que depende dos parâmetros de construção do viscosímetro e das unidades empregadas.

A taxa de deformação pode ser calculada, com boa aproximação para  $\beta = R_1/R_2 > 0,9$  a partir da velocidade angular, em rpm, aplicada no cilindro externo, pela Equação 2.6.

$$\dot{\gamma}_b = \psi \cdot \left( \frac{2R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \cdot \omega \quad (2.6)$$

em que:

$\dot{\gamma}_b$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$R_2$  = Raio do cilindro externo (m)

$R_1$  = Raio do cilindro interno (m)

$\omega$  = Velocidade angular (rpm)

$\psi$  = É função de  $\beta$  e  $n'$ , válida para fluidos generalizados, que serve para corrigir as taxas de deformação do fluxo de fluidos considerados, indevidamente, como newtonianos, conforme a expressão a seguir:

$$\psi = \left( \frac{\beta^{2/n'}}{n' \beta^2} \right) \cdot \left[ \left( \frac{\beta^2 - 1}{\beta^{2/n'} - 1} \right) \right] \quad (2.7)$$

A função de correção das taxas de deformação ( $\psi$ ) será mais próxima de um, quanto mais próximo da unidade for o valor de  $n'$  (índice de comportamento do fluxo). Observe que, quando o fluido for newtoniano, isto é,  $n' = 1$ , então a função  $\psi = 1$ . Daí, a Equação (2.7) fica:

$$\dot{\gamma}_b = \left( \frac{2R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \right) \cdot \omega \quad (2.8)$$

Considerando que a velocidade angular se relaciona com o número de rotações por minuto pela expressão  $\omega = (2\pi/60)N$ , então a Equação 2.8 pode ser descrita da forma:

$$\dot{\gamma}_b = (4\pi / 60) \left( \frac{2R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)} \right) \cdot N \quad (2.9)$$

onde,  $N$  é o número de rotações por minuto. Considerando ainda que todos os parâmetros entre parênteses da Equação 2.9 são constantes para um certo projeto, então pode-se reescrevê-la:

$$\dot{\gamma}_b = A_2 \cdot N \quad (2.10)$$

Onde  $A_2$  é uma constante que depende dos parâmetros construtivos do viscosímetro e das unidades empregadas.

A viscosidade absoluta dos fluidos newtonianos ou aparente para os não-newtonianos, pode ser calculada pela expressão que se segue:

$$\mu_a = \frac{\tau_b}{\dot{\gamma}_b} = \frac{A_1 \cdot \theta}{A_2 \cdot N} = A \left( \frac{\theta}{N} \right) \quad (2.11)$$

### 2.5.2.3 – Viscosímetro rotativo de cilindros co-axiais - Brookfield

O viscosímetro rotativo Brookfield é um instrumento do tipo Searle. Um corpo imerso girando em um fluido mede o torque necessário para vencer a resistência viscosa devido ao cisalhamento provocado. A deflexão, transmitida por uma mola espiralada, é lida em uma escala circular, ou através de painel digital. A taxa de deformação da mola, indicada pela posição do dial, é proporcional a viscosidade do fluido para uma certa velocidade de rotação do corpo imerso.

Os viscosímetros Brookfield são instrumentos que permitem a medida da viscosidade dos fluidos newtonianos e não-newtonianos: aplicáveis nas especificações de rotina e nos estudos de pesquisa.

Utilizando um viscosímetro Brookfield RVT, GUNJAL & WAGHMARE (1987) classificaram como pseudoplástico o comportamento reológico do suco de manga à concentração de 20°Brix e faixa de temperatura entre 40 a 80°C.

### 2.5.3 - Viscosímetro cone-placa

O viscosímetro cone-placa é constituído por um corpo de forma cônica e outro plano em forma de placa circular. O ângulo do corpo cônico é, em geral, muito pequeno ( $\alpha < 1^\circ$ ), com o intuito de satisfazer a aproximação  $\text{tg}\alpha \cong \alpha$ . A escolha do ângulo do cone leva em consideração também a manutenção da taxa de cisalhamento em um valor constante desde o raio igual a zero até o raio máximo.

A tensão cisalhante nos viscosímetros cone-placa pode ser calculada através da expressão:

$$\tau_c = \left( \left( \frac{3}{2\pi} \right) \cdot R_c^3 \right) \cdot Tq \quad (2.12)$$

Onde:

$\tau_c$  = Tensão cisalhante no cone

$R_c$  = Raio externo do cone

$Tq$  = Torque

A expressão que calcula a taxa de deformação é:

$$\dot{\gamma}_c = \frac{\omega}{\text{tg}\alpha} \approx \left( \frac{\pi}{30\alpha} \right) \cdot N \quad (2.13)$$

Onde:

$\dot{\gamma}_c$  = Taxa de deformação

$\omega$  = Velocidade angular

$\alpha$  = Ângulo do cone

N = Velocidade de rotação.

## 2.6 – Reologia de sucos e purês de frutas

Devido a falta de referências bibliográficas, relacionadas ao estudo reológico da polpa do cupuaçu, o item que se segue, foi elaborado a partir de alguns dos trabalhos mais citados na literatura e que, embora abordem o tema de forma diversificada, definem o universo onde o presente estudo se acha inserido.

As referências que tratam de derivados de frutas têm estabelecido os elementos principais que respondem pelo comportamento reológico destes produtos. Estes elementos seriam a temperatura, a concentração de sólidos solúveis (principalmente açúcares), o teor de pectinas e a concentração de sólidos insolúveis (QUEIROZ, 1998).

### 2.6.1 - Estudos reológicos de sucos de frutas

IBARZ *et al.* (1987) trabalhando com suco de pêra clarificado e despectinizado, verificaram que o material apresentou comportamento newtoniano para concentrações entre 30 e 70°Brix e temperaturas entre 5 e 60°C.

A influência da quantidade de sólidos insolúveis no comportamento reológico de sucos foi estudada por QUEIROZ (1998) tendo verificado que a viscosidade do suco de abacaxi decresce com a redução dos sólidos insolúveis, porém, as taxas de redução da viscosidade são diferentes das taxas de redução de sólidos.

Segundo IBARZ *et al.*(1992) o suco e a polpa do pêsego livres de pectina apresentam comportamento de fluido newtoniano.

ANTONIETTO *et al.* (1998) estudando o comportamento reológico dos sucos de laranja e acerola natural e concentrados, observaram que o suco de laranja natural comportou-se como fluido newtoniano e o concentrado como fluido pseudoplástico, enquanto que o suco de acerola, em ambas as situações, apresentou comportamento pseudoplástico.

OLIVEIRA & MENEGALLI (1998) estudaram o comportamento reológico do suco de acerola a diferentes concentrações e temperaturas. usando um reômetro de cilindros concêntricos, concluindo que o suco apresenta comportamento não-newtoniano, podendo ser descrito pela lei da potência.

QUEIROZ *et al.* (2000) estudaram a influência de diferentes teores de sólidos insolúveis suspensos sobre a reologia do suco de manga despectinizado e observaram que todas as frações apresentam comportamento pseudoplástico, descrito pelo modelo de Mizrahi-Berk.

RAO *et al.* (1974) trabalhando com viscosímetro de cilindros concêntricos (Haake, RV2) encontraram para sucos comerciais de maçã

---

(despectinizado e filtrado), na faixa de 41 a 68,3°Brix e faixa de temperatura -10 a 40°C, comportamento newtoniano.

MIZRAHI & BERK (1970) utilizando um viscosímetro de cilindros concêntricos (Contraves Rheomat 15), obtiveram dados reológico do suco concentrado de laranja e do seu soro (suco sem polpa) a concentrações variando de 60 a 65°Brix. O suco concentrado apresentou comportamento pseudoplástico, com tensão inicial e também dependente do tempo (tixotrópico). O soro concentrado e despectinizado foi classificado como fluido newtoniano com valores de viscosidade a 60°Brix muito próximo a de uma solução de sacarose a 60°Brix.

Utilizando o mesmo equipamento VITALI *et al.* (1974) estudaram o comportamento reológico do suco de maracujá a concentrações na faixa de 15,6 a 33,4°Brix e temperaturas entre 20 e 50°C, verificando também comportamento pseudoplástico e dependente do tempo (tixotropia).

RAO & PALOMINO (1974) estudaram o comportamento reológico do suco de mamão à concentração de 7,3°Brix e temperatura de 26°C, utilizando um viscosímetro capilar, resultando em comportamento pseudoplástico.

IBARZ *et al.* (1992) determinaram o comportamento reológico do suco de groselha (despectinizado e clarificado) com concentrações variando entre 35 a 64,5°Brix e faixa de temperatura entre 5 a 60°C, utilizando um viscosímetro de cilindros concêntricos (Haake Rotovisco RV-12), sendo avaliado como fluido newtoniano para todas as amostras.

---

O comportamento reológico do suco de limão a 45°Brix, clarificado e não clarificado, foi classificado como newtoniano e não-newtoniano, respectivamente (SAENZ & COSTELL, 1986).

MANOHAR *et al.* (1991) fizeram medidas reológicas no suco de tamarindo na faixa de 7 a 62°Brix, foi observado que até 19°Brix o suco apresentava comportamento newtoniano e acima de 23°Brix era de natureza pseudoplástica.

SILVA (1999) analisando o suco de acerola industrializado a diferentes concentrações de °Brix e no intervalo de temperatura de 5 a 85°C, observou que o suco apresentou em todas as faixas de temperatura e concentrações estudadas, comportamento não-newtoniano com características pseudoplásticas.

### **2.6.2 - Estudos reológicos de purês de frutas**

De acordo com ADORNO (1997) os purês são estudados de forma análoga aos sucos de frutas, por apresentarem uma natureza diversa dificultando a generalização dos dados obtidos, são submetidos a diferentes condições de medidas e diferentes métodos de obtenção.

Utilizando o reômetro Haake Rotovisco RV-20 com geometria de cilindros concêntricos e de placas paralelas VIDAL (2000) analisou o comportamento reológico da polpa de manga integral centrifugada e despectinizada, encontrando comportamento pseudoplástico para todas as amostra em todos os sistemas de medidas.

---

BHATTACHARYA & RASTOGI (1998) trabalhando com polpa de manga tratada com pectinase a diferentes temperaturas, observaram que a polpa se apresenta como fluido não-newtoniano com características pseudoplásticas.

DURAN & COSTELL (1982) estudaram a caracterização reológica do purê de damasco e este apresentou-se com características de um fluido tixotrópico.

RAO & PALOMINO (1974) e GARCIA *et al.* (1974), analisando o comportamento de purês de frutas tropicais (goiaba, manga, banana e mamão), utilizando viscosímetro de tubo capilar e um viscosímetro Brookfield LVF, observaram que todas as amostras apresentam comportamento pseudoplástico, podendo ser descritos pelo modelo da lei da potência.

CONCEIÇÃO (2000), utilizando um viscosímetro Brookfield RVT, analisou o comportamento reológico da polpa de goiaba tratada com pectinase nas concentrações de 0,001, 0,0013 e 0,0018%, e temperaturas de 30 a 70°C, verificou que todas as amostras apresentaram comportamento pseudoplástico.

## 2.7 - Modelos reológicos

A principal função de um modelo reológico é representar matematicamente a relação entre os valores experimentais da tensão de cisalhamento e taxa de deformação, para um determinado fluido e assim permitir o tratamento analítico do escoamento desses materiais. Esses modelos baseiam-se em aspectos fenomenológicos ou teóricos relacionados com a estrutura do fluido. São úteis para relacionar propriedades reológicas de um fluido com

grandezas práticas como: concentração, temperatura, etc. Esse conhecimento é indispensável no controle de qualidade, controle de processos e no projeto e dimensionamento de equipamentos e processos (VIEIRA, 1995).

### 2.7.1 - Modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência)

O modelo de Ostwald-de-Waelle, também conhecido como Lei da Potência é um dos modelos reológicos mais utilizados para descrever o comportamento reológico dos fluidos não-newtonianos (pseudoplásticos e dilatantes) em amplas faixas de taxa de deformação. Sendo representado pela equação:

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n \quad (2.14)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

K = Índice de consistência ( $Pa \cdot s^n$ )

n = Índice de comportamento do fluxo (adimensional)

Para os valores de  $n < 1$  a viscosidade aparente decresce com o aumento do gradiente de velocidade, caracterizando o fluido como pseudoplástico, para  $n > 1$ , é caracterizado como fluido dilatante e para  $n = 1$  o fluido é classificado como newtoniano.

Apesar de ser um modelo que não se aplica para todo e qualquer fluido, nem a todo intervalo de taxa de deformação, o modelo da Lei da Potência

tem se mostrado em muitos casos adequado para cálculos de engenharia e, devido a sua simplicidade, tem sido amplamente utilizado nesta área (RAO & ANANTHESWARAN, 1982).

### 2.7.2 - Modelos que consideram a tensão inicial

Estes modelos são empregados para analisar o comportamento reológico de fluidos que só iniciam o processo de escoamento quando a tensão de cisalhamento aplicada supera tensão inicial que é própria de cada um destes fluidos.

#### 2.7.2.1- Modelo de Bingham

O modelo de Bingham descreve a mudança na tensão de cisalhamento como função da taxa de deformação através de Equação 2.15

$$\tau - \tau_0 = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2.15)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\tau_0$  = Tensão inicial (Pa)

$\eta_p$  = Viscosidade plástica de Bingham (Pa.s)

Fisicamente, o limite de escoamento representa o valor mínimo de tensão cisalhante que deve ser aplicada para dar início ao escoamento. Enquanto isso, o

atrito entre as partículas dispersas é o responsável pelo outro componente de resistência ao fluxo, a viscosidade plástica (MACHADO, 1996).

### 2.7.2.2 - Modelo de Herschel – Bulkley

Este modelo apresenta três parâmetros reológicos, é uma forma modificada do modelo de Ostwald-de-Waele, ao qual se adiciona, um novo parâmetro, tensão inicial ( $\tau_0$ ).

É um modelo análogo ao de Bingham, sendo representado pela equação:

$$\tau - \tau_{0H} = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (2.16)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\tau_{0H}$  = Tensão de cisalhamento inicial (Pa)

$K_H$  = Índice de consistência ( $Pa \cdot s^n$ )

$n_H$  = Índice de comportamento de fluxo (adimensional)

Este modelo deve ser resolvido através de regressão não linear, pois tem três parâmetros a serem determinados. O procedimento mais empregado é determinar experimentalmente  $\tau_{0H}$  ou então usar o valor estimado pelo modelo de Casson (VIDAL, 1997).

### 2.7.2.3 - Modelo de Casson

Utilizado para escoamento de suspensões de partículas interagindo em meio newtoniano, considerando que as mesmas interagem entre si, CASSON (1959) propôs a seguinte expressão:

$$\tau^{1/2} = K_{oc} + K_c \dot{\gamma}^{1/2} \quad (2.17)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$K_{oc}^{0,5}$  = Tensão de cisalhamento inicial (Pa)<sup>0,5</sup>

$K_c$  = Viscosidade plástica de Casson (Pa.s)<sup>0,5</sup>

Este modelo é o oficialmente admitido para a caracterização de amostras de chocolate, pelo Instituto Internacional do chocolate (RAO & RIZVI, 1986).

#### 2.7.2.4 - Modelo de Mizrahi – Berk

Este foi o modelo proposto por MIZRAHI e BERK (1970) para ser utilizado no estudo do escoamento de suco de laranja concentrado e suspensões de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico.

É uma proposta modificada do modelo de Casson, que se reduz a este quando  $n_M$  é igual a 0,5.

$$\tau^{1/2} - \kappa_{0M} = \kappa_M \dot{\gamma}^{n_M} \quad (2.18)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\kappa_{0M}$  = Raiz quadrada da tensão inicial (Pa)

$\kappa_M$  = Índice de consistência ( $Pa \cdot s^n$ )

$n_M$  = Índice de comportamento de fluxo (adimensional)

### 2.8 - Influência da temperatura e da concentração na viscosidade

A viscosidade dos fluidos pode ser afetada por fatores como: concentração, temperatura, tempo, pressão e gradiente de velocidade. O conhecimento da influência destes fatores no comportamento reológico dos alimentos é de fundamental importância para o controle da qualidade dos produtos durante a estocagem, transporte e comercialização.

Durante o processamento, os alimentos fluidos, como sucos e purês, são submetidos a diversas temperaturas nos evaporadores, pasteurizadores e desaeradores. Com a concentração dos sucos ou purês, ocorre o aumento dos sólidos solúveis e totais variando a composição dos mesmos em cada etapa do processamento. Como consequência as propriedades reológicas são afetadas por mudanças tanto na temperatura como na composição e tem sido objeto de estudo por vários pesquisadores (RAO, 1977; RAO & ANANTHESWARAM, 1982).

Os dados de viscosidade aparente em função da temperatura e concentração são imprescindíveis não só ao dimensionamento de novas instalações industriais mas também na avaliação do desempenho de unidades já instaladas (SILVA, 1999).

Para os fluidos newtonianos, o conhecimento da viscosidade como função da temperatura e concentração é suficiente para o dimensionamento de equipamentos. Para os fluidos não-newtonianos, como a viscosidade aparente varia também com a taxa de deformação, é necessário conhecer a variação das características reológicas destes produtos com a taxa de deformação, temperatura e concentração (HOLDSWORTH, 1971; RAO & ANANTHESWARAN, 1982).

Nos testes para determinação da viscosidade deve-se manter a temperatura constante através de um banho de líquido em fluxo ou de uma célula de controle de temperatura (MACHADO, 1996).

### 2.8.1 – Influência da concentração

A viscosidade de fluidos alimentícios aumenta com o aumento da concentração de sólidos. Esse fato está ligado a dois aspectos interdependentes: o primeiro deve-se à redução de fluido para a lubrificação inter-molecular, com conseqüente aumento do atrito; o segundo aspecto relaciona-se com a formação de hidratos pelos íons e moléculas, em altas concentrações, isto porque o solvente não é mais suficiente para saturar todas as moléculas, e essas começam a formar agregados (TELIS, 1992).

A variação da viscosidade com o teor de sólidos solúveis pode ser descrita por diferentes expressões. Geralmente são do tipo potencial ou exponencial (RAO *et al.*, 1984; VITALI & RAO, 1982).

$$\eta = a \cdot C^b \quad (2.19)$$

Na Equação (2.19) **a** e **b** são constantes e **C** a concentração em °Brix.

De acordo com os valores dos coeficientes de regressão obtidos, por IBARZ *et al.* (1994), o modelo exponencial descreve bem o efeito dos sólidos solúveis sobre a viscosidade do suco de laranja clarificado. Foi também observado que o parâmetro **b** decresce com o aumento da temperatura, o qual indica que o efeito da temperatura sobre a viscosidade é mais pronunciada a baixas temperaturas. O mesmo comportamento é verificado quando substituem-se os valores da concentração por correspondentes valores de atividade de água. Neste caso, o modelo da potência ajustou-se melhor aos dados experimentais.

### 2.8.2 – Influência da temperatura

A viscosidade dos fluidos varia com a temperatura e a pressão, sendo porém mais sensível à temperatura que a pressão. As variações de temperatura produzem variações opostas em líquidos e gases. Quando a temperatura aumenta, a viscosidade do líquido diminui, porém a viscosidade do gás aumenta (SISSOM & PITTS, 1988).

A equação de Arrhenius (Equação 2.20) tem sido utilizada para descrever o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente de fluidos não-newtonianos.

$$\eta = \eta_x \exp ( E_a / RT) \quad (2.20)$$

Onde:

$\eta_x$  = Constante (Pa.s)

T = Temperatura absoluta (K)

$E_a$  = Energia de ativação para escoamentos viscosos (kcal/gmol)

R = Constante universal dos gases (1.987 cal/gmol K)

De acordo com a Equação (2.20) o aumento da temperatura tem efeito de diminuir a viscosidade e geralmente, quanto maior a energia de ativação, maior é o efeito da temperatura na viscosidade.

De maneira geral, aumentando-se a temperatura, há uma diminuição do índice de consistência (K), enquanto que o índice de comportamento de fluxo (n), é pouco afetado.

VITALI *et al.* (1982) estudaram o efeito da temperatura na viscosidade aparente de purês de goiaba nas concentrações entre 9,8 a 16,9°Brix e faixa de temperatura entre 25 a 60°C, observando que houve uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura.

### 3 – MATERIAIS E MÉTODO

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DEAg) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Campus II.

#### 3.1 – Matéria-prima

A polpa do cupuaçu utilizada neste experimento foi produzida na cidade de Manaus-AM, sob supervisão de funcionários do Ministério da Agricultura e do Abastecimento da mesma cidade e posteriormente transportada para o LAPPA - DEAg.

O fluxograma para obtenção da polpa de cupuaçu utilizada neste trabalho está representado na Figura 3.1.

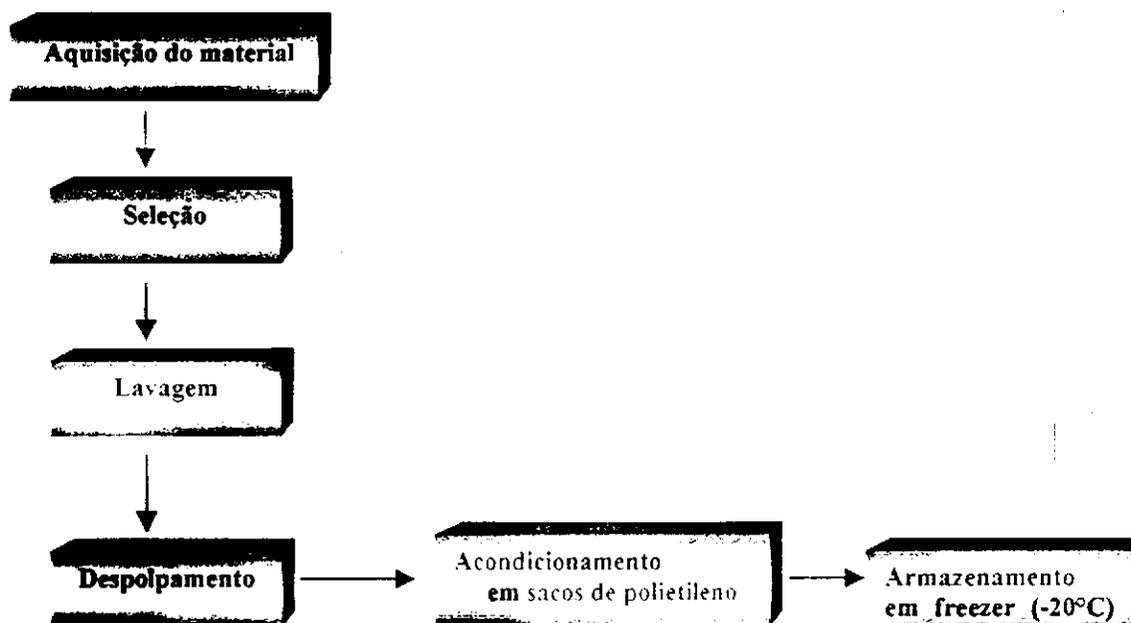


Figura 3.1 - Fluxograma para obtenção da polpa integral do cupuaçu.

### 3.1.1 – Seleção

A seleção foi feita manualmente, dando preferência aos frutos sem danos aparentes e em estágio de maturação semelhante em todo o lote, já que a maturação é facilmente reconhecida pelo cheiro agradável e forte que exala, característico do cupuaçu.

### 3.1.2 – Lavagem

A lavagem dos frutos foi feita por imersão em solução de hipoclorito de sódio a uma concentração de 20ppm, sendo posteriormente retirado o excesso em água corrente.

### 3.1.3 – Despulpamento

Após a lavagem os frutos foram quebrados, eliminando inicialmente a casca e a placenta. Em seguida foi feita a extração manual da polpa que envolve as sementes e posteriormente realizada a homogeneização em liquidificador doméstico.

### 3.1.4 – Acondicionamento

A polpa integral foi acondicionada em embalagens de polietileno de baixa densidade com capacidade para 500g.

### **3.1.5 – Congelamento e armazenamento**

O material foi congelado em freezer comercial a  $-20^{\circ}\text{C}$  onde permaneceu armazenado durante o período de realização dos ensaios experimentais.

## **3.2 – Caracterização físico-química e química do material**

### **3.2.1 - Acidez total titulável**

Foi determinada acidez do produto com auxílio de um potenciômetro através da técnica de titulação com solução de NaOH padronizada (AOAC, 1984). Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido cítrico (p/p).

### **3.2.2 - Açúcares redutores, não redutores e totais**

A determinação dos açúcares redutores e totais seguiu metodologia descrita pela AOAC (1984). Ambos os resultados foram expressos em porcentagem de glicose (p/p). O teor de açúcares não redutores foi obtido pela diferença entre os açúcares totais e redutores e o resultado foi expresso em porcentagem de sacarose (p/p).

### **3.2.3- Sólidos solúveis (°Brix)**

Esta análise foi realizada através do método da leitura direta em refratômetro tipo Abbe, marca Atago.

### **3.2.4- Cinzas**

O teor de cinzas foi determinado através do método descrito pela AOAC (1984) e os resultados foram expressos em porcentagem (p/p).

O princípio deste método fundamenta-se na perda de peso que ocorre quando o produto é incinerado a 525°C, com destruição da matéria orgânica, sem apreciável decomposição dos constituintes do resíduo mineral ou perda por volatilização.

### **3.2.5- pH**

Esta determinação foi feita através do método potenciométrico. Os resultados foram expressos em unidades de pH.

### **3.2.6- Pectina**

Determinação feita através da metodologia proposta em PEARSON (1970). O princípio do método baseia-se na neutralização das cargas dos resíduos de ácido urônico livres, pelos íons de cálcio, gelificando e precipitando

---

a pectina. Os resultados foram expressos em porcentagem de pectato de cálcio (p/p).

### **3.2.7- Sólidos solúveis e insolúveis**

Os sólidos insolúveis e solúveis foram determinados pelo método descrito pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (LARA *et al.*, 1976). O princípio deste método baseia-se na filtração da amostra dissolvida em água quente, retendo os sólidos insolúveis em papel de filtro e na evaporação do filtrado para obtenção dos sólidos solúveis. Os resultados foram expressos em (p/p).

### **3.2.8 - Sólidos totais e umidade**

Os sólidos totais e a umidade foram determinados através da metodologia descrita pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (LARA *et al.*, 1976). Os resultados foram expressos em porcentagem (p/p).

## **3.3 – Preparo do material**

### **3.3.1 – Material integral**

O material denominado integral, consiste na polpa do cupuaçu, sem qualquer tratamento para a realização das medidas reológicas, passando apenas pelos processos de congelamento e descongelamento.

### 3.3.2 – Material peneirado

As amostras integrais foram submetidas a peneiramento em peneiras de aço inoxidável, malha de 0,59 mm em agitador mecânico marca Pavitest, no nível de agitação máxima durante 20 minutos.

### 3.3.3 – Material a 9°Brix

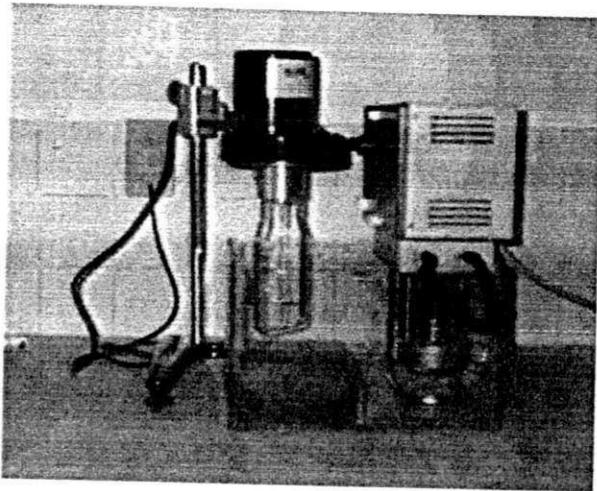
Para obtenção da concentração desejada para o estudo, a polpa integral foi diluída com água destilada acompanhando-se o teor de sólidos solúveis com refratômetro manual.

## 3.4 – Estudo reológico

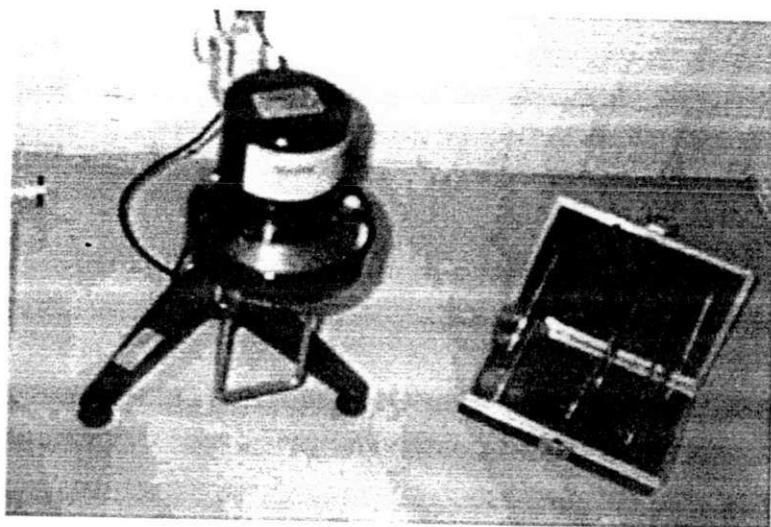
As leituras para determinação das medidas reológicas foram realizadas em um viscosímetro de cilindros concêntricos marca Brookfield, modelo RVT, fabricado por Brookfield Engineering Laboratories, Inc., E.U.A. (Figura 3.3). As medidas foram efetuadas utilizando-se o spindle nº6 para todas as amostras, às temperaturas de 10, 15, 20, 25 e 30°C. As leituras do torque foram feitas sempre após os primeiros 30s de cisalhamento.

Para a obtenção das temperaturas desejadas foi utilizado uma cuba de vidro, onde foi colocado um sistema aquecimento/resfriamento com circulação forçada de água (Figura 3.2). As amostras eram colocadas em béquer, mergulhadas no banho até atingirem a temperatura de equilíbrio. Após o equilíbrio dava-se início às leituras, realizadas sempre em escala ascendente de velocidade de rotação. Foram utilizadas as velocidades de 1, 2,5, 5, 10, 20 e 50

rpm. As medições foram realizadas em sextuplicata, utilizando 500g da amostra em cada ensaio.



**Figura 3.2** – Equipamentos utilizados nas medidas reológicas: viscosímetro e banho-maria.



**Figura 3.3** - Viscosímetro Brookfield - RVT com conjunto de spindles

### 3.4.1 – Conversão dos dados experimentais

O procedimento utilizado para a transformação das leituras em medidas reológicas seguiu a metodologia proposta por MITSCHKA (1982).

#### 3.4.1.1 – Tensão de cisalhamento

As tensões de cisalhamento, em Pa, foram obtidas pela multiplicação dos valores da deflexão da mola, lidas no dial do viscosímetro (torque), por um fator  $k_{at}$  (Tabela 3.1) correspondente ao spindle utilizado:

$$\tau_1 = k_{at} \alpha_1 \quad (3.1)$$

Onde:

$\tau_1$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$k_{at}$  = Fator que corresponde ao spindle utilizado (adimensional)

$\alpha_1$  = Leitura do torque

**Tabela 3.1** – Fatores de conversão para os spindles do viscosímetro Brookfield-RVT

<i>Nº do spindle</i>	1	2	3	4	5	6	7
$k_{at}$	0,035	0,119	0,279	0,539	1,05	2,35	8,4
$n = 0,1$	1,728	1,431	1,457	1,492	1,544	1,366	1,936
0,2	0,967	0,875	0,882	0,892	0,907	0,851	1,007
0,3	0,705	0,656	0,656	0,658	0,663	0,629	0,681
0,4	0,576	0,535	0,530	0,529	0,528	0,503	0,515
$k_{ny}$ 0,5	0,499	0,458	0,449	0,445	0,442	0,421	0,413
0,6	0,449	0,404	0,392	0,387	0,382	0,363	0,346
0,7	0,414	0,365	0,350	0,343	0,338	0,320	0,297
0,8	0,387	0,334	0,317	0,310	0,304	0,286	0,261
0,9	0,367	0,310	0,291	0,283	0,276	0,260	0,232
1,0	0,351	0,291	0,270	0,262	0,254	0,238	0,209

Fonte: MITSCHKA (1982)

### 3.4.1.2 – Índice de comportamento de fluxo

O índice de comportamento de fluxo é uma grandeza que indica o quanto o fluido se afasta ou aproxima-se do comportamento newtoniano. Segundo o método apresentado em MITSCHKA (1982), os valores de tensão de cisalhamento ( $\tau_1$ ) e da velocidade de rotação ( $N_1$ ) são plotados na forma log-log. Faz-se uma regressão linear do tipo  $y = bx + a$ , onde o coeficiente angular da reta corresponde ao fator ( $n$ ) da Tabela 3.1, que representa o índice de comportamento de fluxo.

### 3.4.1.3 – Taxa de deformação

Segundo o método de MITSCHKA (1982), o valor da taxa de deformação é determinado em  $s^{-1}$ , através da multiplicação da velocidade de rotação ( $N_1$ ) pelo fator  $k_{ny}$  (Tabela 3.2) que será diferente para cada valor de ( $n$ ) e depende também do spindle utilizado.

$$\dot{\gamma} = k_{ny} (n) N_1 \quad (3.2)$$

Onde:

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$k_{ny}$  = Fator que é função do índice do fluxo e do spindle utilizado (adimensional)

$N_1$  = Velocidade de rotação (rpm)

$n$  = Índice de comportamento de fluxo (adimensional)

### 3.4.1.4 – Viscosidade aparente

A viscosidade aparente caracteriza os fluidos não-newtonianos, que possuem uma relação não-linear entre a tensão de cisalhamento e taxa de deformação (TAGER, 1978). Foi obtida através da equação:

$$\eta_a = \tau_1 / \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

Onde:

$\eta_a$  = Viscosidade aparente (Pa.s)

$\tau_1$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

### 3.5 – Análise matemática

Para ajuste das curvas de taxa de deformação versus tensão de cisalhamento foram utilizados os modelos reológicos de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), Casson e Herschel-Bulkley. A escolha destes modelos foi baseado no fato de serem comumente utilizados em trabalhos abordando a reologia de polpas e sucos de frutas (QUEIROZ, 1998; ADORNO, 1997; BEZERRA, 1997 e CONCEIÇÃO, 2000).

Os parâmetros de cada modelo foram determinados utilizando-se o software STATISTICA, versão 5.0, através de regressão não-linear, utilizando o método Quasi-Newton. O efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente foi determinado também, através de regressão não-linear. Para a escolha do melhor ajuste foram analisados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), qui-quadrado ( $\chi^2$ ), soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e o coeficiente de correlação (R).

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Caracterização química e físico-química da matéria-prima

Os resultados obtidos das análises da polpa do cupuaçu integral, estão apresentados na Tabela 4.1, obtidos a partir de seis repetições.

**Tabela 4.1** – Caracterização química e físico-química da polpa integral do cupuaçu.

<i>PARÂMETROS</i>	<i>VALORES OBTIDOS</i>
<i>pH</i>	<i>3,54 ± 0,018</i>
<i>Sólidos solúveis (°Brix)</i>	<i>12 ± 0,0</i>
<i>Acidez total (% ácido cítrico)</i>	<i>1,69 ± 0,014</i>
<i>Cinzas (%)</i>	<i>0,67 ± 0,014</i>
<i>Açúcares redutores (% glicose)</i>	<i>4,86 ± 0,66</i>
<i>Açúcares totais (%glicose)</i>	<i>7,84 ± 0,31</i>
<i>Açúcares não redutores (% sacarose)</i>	<i>2,83 ± 0,89</i>
<i>Pectina (mg de pectato de cálcio/100g)</i>	<i>415,17 ± 64,3</i>
<i>Sólidos totais (%)</i>	<i>14,94 ± 0,26</i>
<i>Sólidos insolúveis (%)</i>	<i>2,74 ± 0,11</i>
<i>Sólidos solúveis (%)</i>	<i>12,19 ± 0,22</i>
<i>Umidade (% base úmida)</i>	<i>84,92 ± 0,07</i>
<i>Ácido ascórbico ( mg 100g de polpa)</i>	<i>33,76 ± 1,58</i>

Os resultados obtidos estão na faixa dos valores recomendados no regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade de

polpa de fruta do Ministério da Agricultura e Abastecimento (BRASIL, 2000), conforme se vê na Tabela 4.2 onde são apresentados os valores fixados por este órgão.

**Tabela 4.2**– Padrões de identidade e qualidade fixados para a polpa do cupuaçu

<i>Componentes químicos</i>	<i>Valor mínimo</i>
<i>Sólidos solúveis (°Brix)</i>	9,00
<i>pH</i>	2,60
<i>Acidez total (g ácido cítrico 100g)</i>	1,50
<i>Ácido ascórbico (mg/100g)</i>	18,00
<i>Açúcares totais (g/100g)</i>	6,00
<i>Sólidos totais (g/100g)</i>	12,00

Fonte: (BRASIL, 2000).

Para efeito de comparação, embora os dados sobre a composição química de frutos sejam afetados por numerosos fatores, tais como: grau de maturidade e diferença entre cultivares, a Tabela 4.3 apresenta os valores da composição química do cupuaçu obtidos por Chaar (1980) Oliveira (1981) e Barbosa *et al.* (1978) citados por VENTURIERE (1993). Observa-se na Tabela 4.3 que os valores de pH estão na mesma faixa de valores determinados neste estudo (Tabela 4.1), mas os valores de °Brix e ácido ascórbico encontram-se bem abaixo. Já a acidez e os açúcares totais atingiram valores, em média, 28% e 40%, respectivamente, superiores nos trabalhos apresentados por estes autores. Verifica-se também que os dados de pectina determinados estão na mesma faixa de valores de Barbosa *et al.* (1978) citado por VENTURIERE (1993).

**Tabela 4.3** – Composição química da polpa integral do cupuaçu.

<b>PARÂMETROS</b>	<i>Barbosa et al.</i> (1978)	<i>Chaar (1980)</i>	<i>Oliveira (1981)</i>
<i>pH</i>	3,3	3,6	3,2
<i>Sólidos solúveis (°Brix)</i>	10,8	10,5	10,8
<i>Acidez total (%)</i>	2,15	2,35	2,0
<i>Cinzas (%)</i>	0,67	0,73	0,81
<i>Açúcares redutores (%)</i>	3,33	3,0	2,9
<i>Açúcares totais (%)</i>	11,0	-	-
<i>Açúcares não redutores (%)</i>	-	5,81	4,0
<i>Pectina (mg/100g)</i>	390	703	850
<i>Sólidos totais (%)</i>	11	-	-
<i>Umidade (% base úmida)</i>	89,0	86,84	87,80
<i>Ácido ascórbico (mg/100g de polpa)</i>	23,12	28,32	18,5

Fonte: VENTURIERI (1993)

Os valores dos sólidos solúveis, totais e insolúveis determinados para a polpa de cupuaçu integral, 9°Brix e peneirada estão representados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** - Valores da caracterização físico-química das diferentes amostras da polpa de cupuaçu.

<b>Composição</b>	<b>Integral</b>	<b>9°Brix</b>	<b>Peneirada</b>
<i>Sólidos solúveis</i>	12 ± 0,00	9 ± 0,00	12 ± 0,00
<i>Sólidos totais</i>	15,08 ± 0,04	11,95 ± 0,04	15,21 ± 0,10
<i>Sólidos insolúveis</i>	2,74 ± 0,11	1,83 ± 0,16	2,16 ± 0,10

De acordo com a Tabela 4.4, observa-se que a amostra peneirada apresentou maior valor para os sólidos totais seguida da amostra integral e por último a 9ºBrix. Com relação aos sólidos insolúveis o peneiramento reduziu o valor dos sólidos em 21,17% do material integral.

## 4.2 – Estudo reológico

Os dados experimentais obtidos para cada amostra a diferentes temperaturas foram correlacionados através de três modelos reológicos: Casson, Ostwald-de-Waele (Lei da Potência) e Herschel-Bulkley.

### 4.2.1 – Modelo de Casson

Os parâmetros obtidos para o modelo de Casson e os parâmetros estatísticos dos ajustes encontram-se na Tabela 4.5. Observa-se que os valores da viscosidade plástica de Casson ( $K_C$ ) situam-se na faixa de 0,44 a 0,49 (Pa.s)<sup>0,5</sup>, para a polpa a 9ºBrix, de 0,58 a 0,67 (Pa.s)<sup>0,5</sup> para a polpa peneirada e de 0,69 a 0,80 (Pa.s)<sup>0,5</sup> para a polpa integral.

**Tabela 4.5** – Parâmetros do modelo de Casson para a polpa de cupuaçu nas diferentes amostras estudadas

<i>Amostra</i>	<i>T (°C)</i>	$K_{0c} (Pa)^{0,5}$	$K_c (Pa.s)^{0,5}$	$\chi^2$	$R^2$	$R$	$SSR$
<i>9°Brix</i>	10	3,98461	0,44419	0,00069	0,85979	0,92725	0,68390
	15	3,63337	0,48711	0,00077	0,83213	0,91221	1,01742
	20	3,57839	0,45385	0,00117	0,80460	0,89699	1,06328
	25	3,39081	0,47515	0,00077	0,86657	0,93090	0,73886
	30	3,21060	0,49412	0,00084	0,85941	0,92704	0,84895
<i>Peneirada</i>	10	5,21212	0,67926	0,00892	0,80434	0,89685	1,41006
	15	4,96976	0,60297	0,00176	0,85540	0,92487	0,96557
	20	4,74311	0,61961	0,00101	0,83423	0,91336	1,19848
	25	4,70289	0,60913	0,00099	0,85743	0,92597	0,96923
	30	4,42215	0,58781	0,00138	0,82999	0,91104	1,11191
<i>Integral</i>	10	5,39268	0,71490	0,00107	0,80790	0,89883	1,52672
	15	4,95796	0,69972	0,00116	0,88230	0,93931	1,02605
	20	4,68435	0,73551	0,00123	0,88953	0,94315	1,05549
	25	4,34626	0,78154	0,00074	0,91673	0,95746	0,87162
	30	4,13216	0,80128	0,00074	0,93763	0,96831	0,67096

SSR - soma dos quadrados dos resíduos,  $R^2$  - coeficiente de determinação,  $R$  - coeficiente de correlação

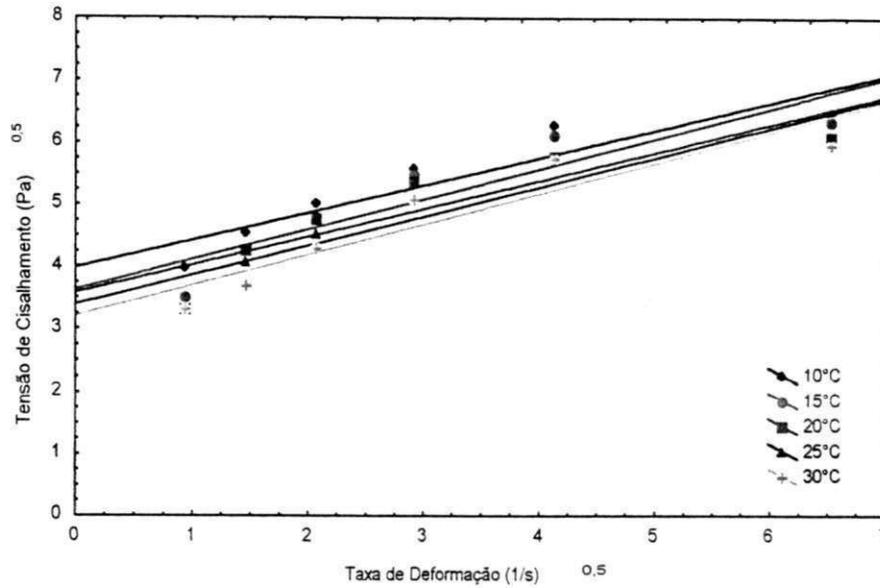
—> Estes resultados indicam que a eliminação de partes dos sólidos teve influência sobre o valor de  $K_c$ . Esta influência mostrou-se mais intensa no caso dos sólidos solúveis onde a diminuição de 12°Brix (integral) para 9°Brix provocou uma redução média de 37% em  $K_c$ . SILVA (1999) observou este mesmo comportamento para o suco de acerola a diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Em relação a temperatura a variação de  $K_c$  para os materiais 9°Brix e peneirado foi pouco perceptível e não se confirma tendências de aumento ou diminuição. No material integral o valor de  $K_c$ , excetuando-se a 15°C, reflete um aumento com a temperatura, como pode ser verificado na Tabela 4.4.

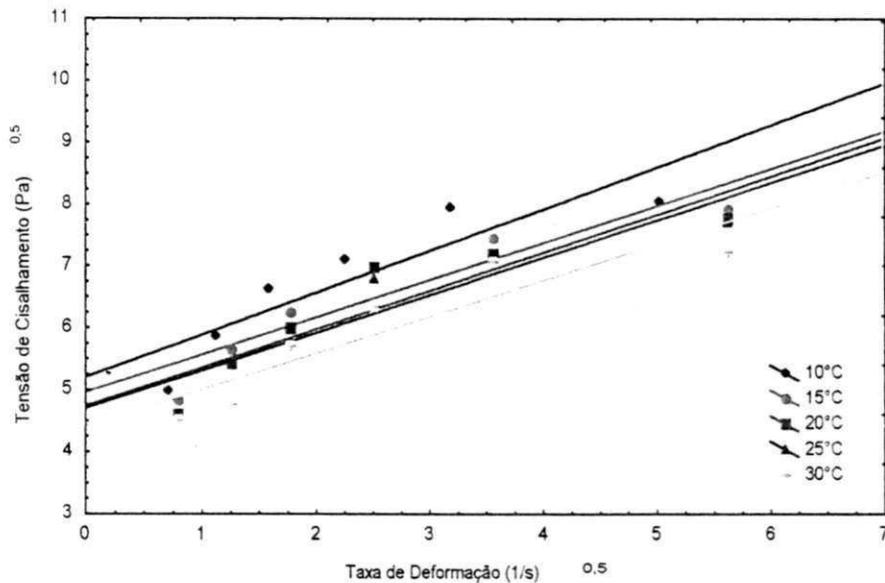
\*Analisando-se os valores do parâmetro  $K_{0c}$  nota-se que existe uma diminuição com o aumento da temperatura em todas as amostras. CONCEIÇÃO (2000) e VIDAL (2000) descreveram o mesmo comportamento para este parâmetro quando trabalharam com polpa de goiaba tratada com pectinase e polpa de manga despectinizada, respectivamente.

Observando-se os parâmetros estatísticos, verifica-se que o coeficiente de correlação ( $R$ ) varia entre 0,89 a 0,96 para todas as amostras. Os valores de  $R^2$  oscilaram entre 0,80 a 0,93, sendo que a amostra integral apresentou os maiores valores (0,89 a 0,93). Os valores de  $\chi^2$  para todas as amostras, variaram entre 0,0089 a 0,0006, isto é, estão próximos de zero, configurando ajustes satisfatórios.

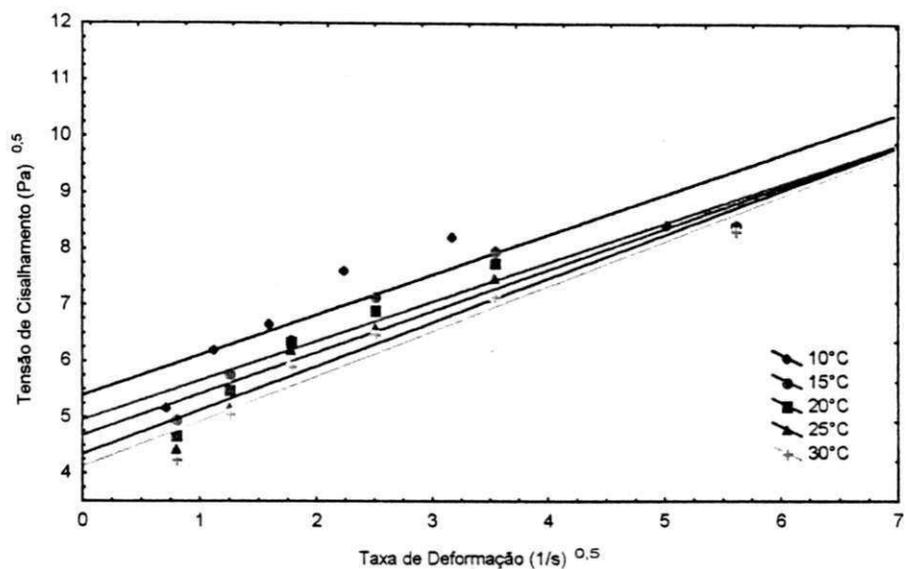
Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 estão representadas as curvas da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, para a polpa de cupuaçu 9°Brix, peneirada e integral, nas temperaturas de 10 a 30°C, ajustadas pelo modelo de Casson. Observa-se nestas figuras que as curvas representando todas as amostras em todas as temperaturas não passam pela origem, excluindo-as da definição de fluidos newtonianos.



**Figura 4.1** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu a 9ºBrix descrita pelo modelo de Casson.



**Figura 4.2** – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu peneirada descrita pelo modelo de Casson



**Figura 4.3** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu integral descrita pelo modelo de Casson.

## 4.2.2 – Modelo de Ostwald-de-Waelle

Os parâmetros de ajuste do modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência), encontram-se na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** - Parâmetros do modelo de Ostwald-de-Waelle (Lei da Potência) para a polpa de cupuaçu nas diferentes condições estudadas.

<i>Amostra</i>	<i>T (°C)</i>	<i>K (Pa.s<sup>n</sup>)</i>	<i>n</i>	<i>χ<sup>2</sup></i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>R</i>	<i>SSR</i>
<i>9°Brix</i>	10	17,9628	0,24272	0,00067	0,95185	0,97563	26,2865
	15	15,7025	0,27021	0,00078	0,93924	0,96914	36,7007
	20	15,1381	0,25819	0,00072	0,93710	0,96804	30,8705
	25	13,7010	0,28096	0,00092	0,96238	0,98100	18,8550
	30	12,5977	0,29802	0,00096	0,93823	0,96823	33,1681
<i>Peneirada</i>	10	34,2030	0,22282	0,00094	0,92665	0,96262	92,9360
	15	29,6900	0,23078	0,00054	0,96667	0,98319	36,6403
	20	27,5972	0,24160	0,00172	0,94711	0,97319	58,9919
	25	26,9822	0,24143	0,00117	0,96481	0,98224	36,4774
	30	24,0389	0,24562	0,00083	0,92652	0,96256	66,4971
<i>Integral</i>	10	36,7706	0,22545	0,00119	0,92995	0,96434	105,5153
	15	30,4715	0,25786	0,00092	0,97051	0,98514	46,6207
	20	27,9726	0,27676	0,00098	0,97680	0,98833	37,9915
	25	24,8361	0,30561	0,00098	0,98697	0,99346	22,3334
	30	22,7764	0,32420	0,00076	0,99510	0,99754	8,36703

SSR - soma dos quadrados dos resíduos, R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação, R - coeficiente de correlação

Analisando os resultados da Tabela 4.5, verifica-se que o aumento da temperatura provocou a diminuição do índice de consistência (K) nos três materiais, apresentando valores na faixa de 17,9628 a 12,5977 Pa.s<sup>n</sup> na amostra 9°Brix, 34,2030 a 24,0389 Pa.s<sup>n</sup> na amostra peneirada e os maiores valores na polpa integral que variou de 36,7706 a 22,7764 Pa.s<sup>n</sup>. A redução no teor de sólidos insolúveis pelo peneiramento não reduziu a média do valor de K para as cinco temperaturas estudadas, obtendo-se um valor de 28,50 (Pa.s<sup>n</sup>) contra 28,56 (Pa.s<sup>n</sup>) do material integral. A redução no °Brix, no entanto, provocou uma

diminuição de 47% no valor médio de K em relação ao produto integral. Podendo-se observar que os valores do parâmetro K diminuíram com a redução na concentração de sólidos solúveis, indicando a influência destes constituintes no comportamento reológico do material.

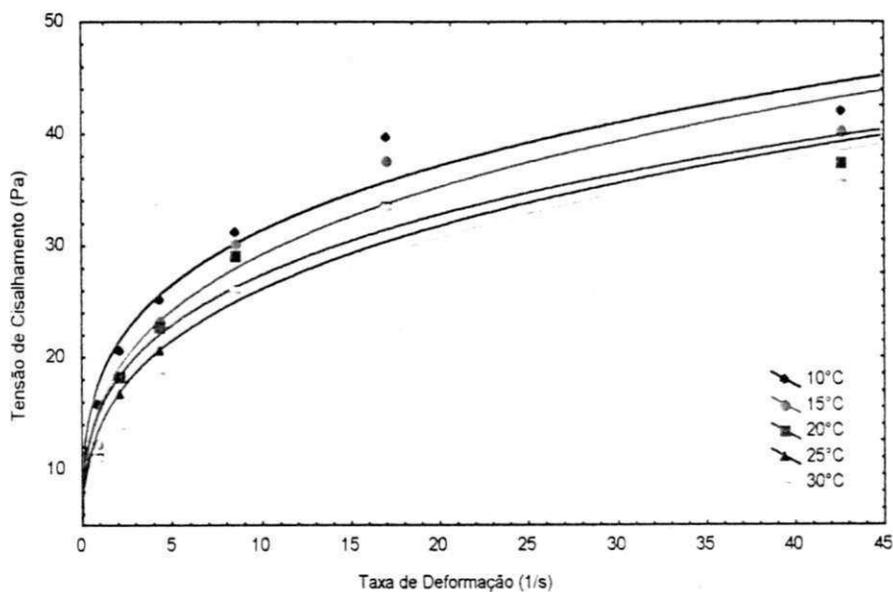
ADORNO (1997) estudou o suco de mamão às concentrações de 10 a 40°Brix e descreveu um comportamento semelhante para o índice de consistência (K) que diminuiu com o aumento da temperatura para as concentrações de 10 e 15°Brix e aumentaram com o aumento do conteúdo de sólido solúveis.

O índice de comportamento do fluxo ( $n$ ) foi menor que a unidade em todas as amostras, caracterizando-as como fluido pseudoplásticos. De maneira geral o valor de  $n$  aumentou com o aumento da temperatura, resultado semelhante foi obtido por SILVA (1999) trabalhando com suco de acerola.

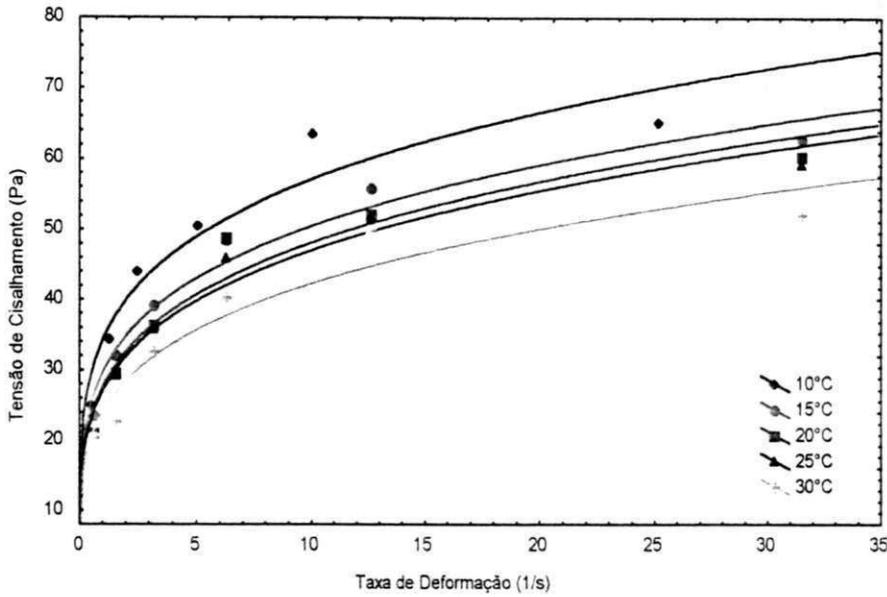
Na análise dos resultados estatísticos para o modelo de Ostwald-de-Waelle, verifica-se que o coeficiente de correlação ( $R$ ), variou entre 0,96 e 0,99 e os valores de  $R^2$  oscilaram entre 0,92 e 0,99. Os valores de  $\chi^2$  variaram entre 0,0017 a 0,0005. Comparando-se os valores de  $R^2$  e  $\chi^2$  obtidos com os modelos de Casson e Ostwald-de-Waelle, verifica-se um melhor desempenho deste segundo modelo.

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 estão representadas as curvas de ajuste para o modelo de Ostwald-de-Waelle das curvas de escoamento (tensão de cisalhamento versus taxa de deformação), obtidas nas cinco diferentes temperaturas para a polpa de cupuaçu a 9°Brix, peneirada e integral.

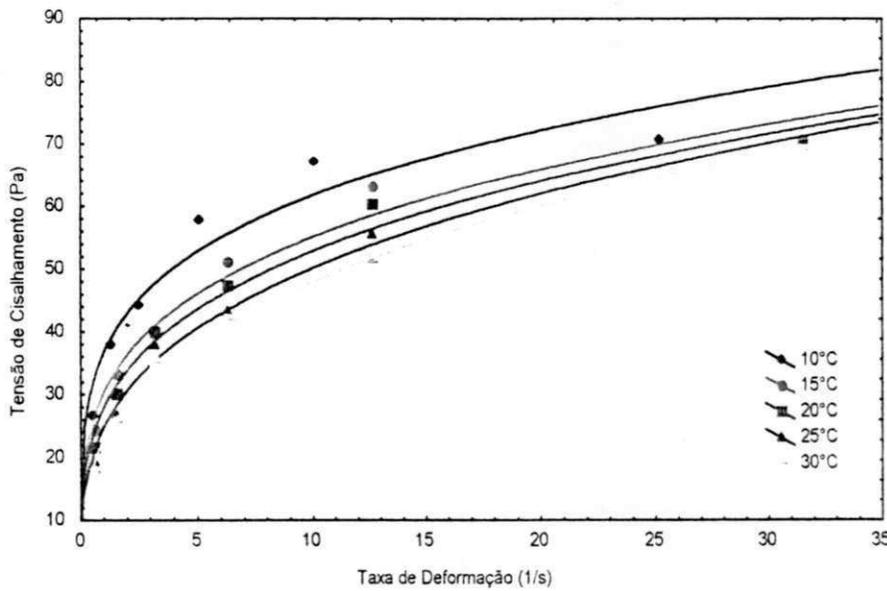
Da mesma forma que o observado no modelo de Casson, verifica-se, pela posição relativa das curvas, a redução nas viscosidades aparentes com o aumento de temperatura. Os valores de tensão de cisalhamento decrescem em todas as amostras com o aumento da temperatura. CONCEIÇÃO (2000) descreve esse mesmo comportamento para polpa de goiaba tratada com pectinase.



**Figura 4.4** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu a 9°Brix descrita pelo modelo de Ostwald-de-Waele.



**Figura 4.5** – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu peneirada descrita pelo modelo de Ostwald-de-Waele.



**Figura 4.6** – Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu integral descrita pelo modelo de Ostwald-de-Waele.

### 4.2.3 – Modelo de Herschel-Bulkley

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores dos parâmetros de ajuste da distribuição qui-quadrado ( $\chi^2$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de correlação ( $R$ ) e soma dos quadrados dos desvios (SSR) obtidos com o modelo de Herschel-Bulkley.

**Tabela 4.7** - Parâmetros com o modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu nas diferentes condições estudadas.

Amostra	T (°C)	$K_H$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$n_H$	$\tau_{OH}$ (Pa)	$\chi^2$	$R^2$	$R$	SSR
9°Brix	10	719,8080	0,00994	-703,710	0,00021	0,97408	0,98695	14,1509
	15	20069,49	0,00051	-20056,3	0,00024	0,98012	0,99001	12,0094
	20	32821,87	0,00035	-32809,0	0,00042	0,98862	0,99429	5,58560
	25	317,4650	0,02126	-305,851	0,00014	0,98870	0,99433	5,66280
	30	119,7010	0,05394	-109,152	0,00038	0,96271	0,98118	19,7772
Peneirada	10	37710,98	0,00029	-37677,8	0,00061	0,96841	0,98408	40,0178
	15	33367,65	0,00031	-33339,5	0,00025	0,99453	0,99726	6,00459
	20	26326,69	0,00039	-26299,8	0,00022	0,98165	0,99077	20,4759
	25	25747,24	0,00039	-25751,8	0,00085	0,99224	0,99611	8,03444
	30	7815,560	0,00118	-7793,02	0,00011	0,95377	0,97661	41,8322
Integral	10	43657,58	0,00027	-43622,0	0,00014	0,97135	0,98557	43,14693
	15	237,9210	0,04863	-209,140	0,00017	0,98788	0,99392	19,15740
	20	169,0830	0,06777	-142,880	0,00013	0,99352	0,99675	10,60380
	25	60,73780	0,16454	-37,1838	0,00014	0,99406	0,99703	10,17210
	30	36,78450	0,23830	-14,8016	0,00019	0,99754	0,99877	4,193600

SSR - soma dos quadrados dos resíduos,  $R^2$  - coeficiente de determinação,  $R$  - coeficiente de correlação

Observando os valores da Tabela 4.7, verifica-se que o parâmetro  $\tau_{OH}$  (tensão inicial), não apresentou tendências definidas em função da temperatura para a amostra 9°Brix. No entanto, para as amostras peneirada e integral o aumento da temperatura provoca a diminuição, em módulo, dos valores da tensão inicial.

O mesmo comportamento para a tensão inicial foi encontrado por ADORNO (1997) estudando suco de manga nas temperaturas de 10 a 50°C e concentrações de 10 a 28°Brix. Para a concentração de 10°Brix o parâmetro também não apresentou tendência definida.

VITALI *et al.* (1974) também observaram o mesmo comportamento para suco de maracujá em várias concentrações (10 a 50°Brix) e temperaturas (10 a 50°C), isto é, a tensão inicial diminui com o aumento da temperatura.

O parâmetro tensão inicial apresentou valores negativo para todas as condições e temperaturas estudadas. O mesmo foi constatado em BRANCO (1995) que estudando suco de laranja concentrado (55°Brix) à uma temperatura mínima de -19,4°C, encontrou valores negativos para o parâmetro tensão inicial. Segundo a autora os valores negativos, neste caso, podem ter ocorrido devido a interferência dos cristais de gelo nos ensaios com baixas taxas de deformação.

Observando-se os valores do índice de consistência ( $K_H$ ) na Tabela 4.6, verifica-se a diminuição dos valores com o aumento da temperatura nas amostras peneirada e integral. Para a condição 9°Brix os valores de  $K_H$  oscilam com a temperatura, não apresentando um comportamento definido.

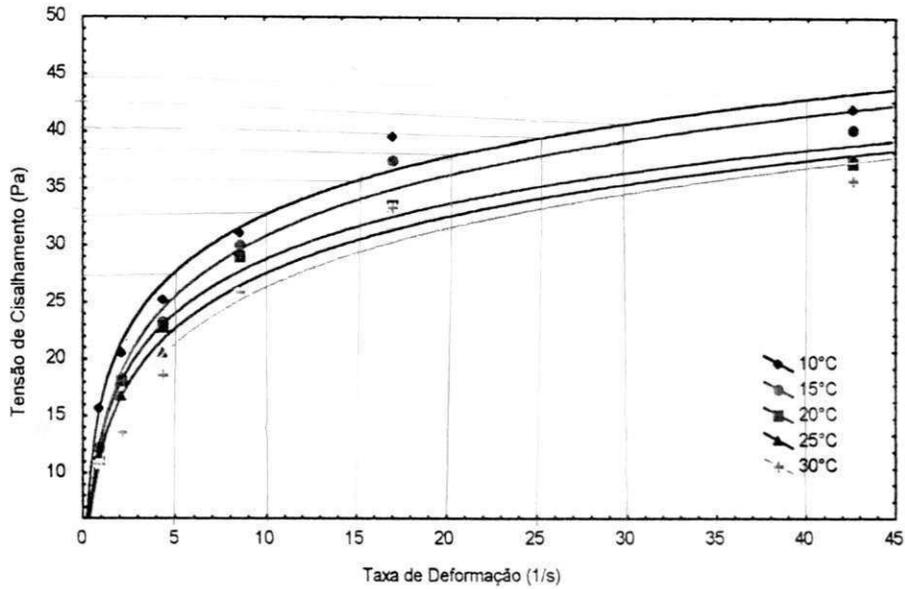
O valor do índice de comportamento de fluxo ( $n_H$ ) nas amostras integral e peneirada aumentam com o aumento da temperatura. No material 9°Brix não se constata uma tendência definida em relação à temperatura, mas em todas as amostras os valores de  $n_H$  foram menor que a unidade, confirmando a pseudoplasticidade da polpa. Resultados semelhantes foram obtidos por OLIVEIRA & MENEGALLI (1998) trabalhando com suco de acerola em várias concentrações (8 a 27°Brix) e temperaturas (10, 30 e 50°C).

Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram maiores que 0,97 em todas as amostras e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ) variou entre 0,00085 e 0,00011, confirmando um ótimo ajuste do modelo aos dados experimentais.

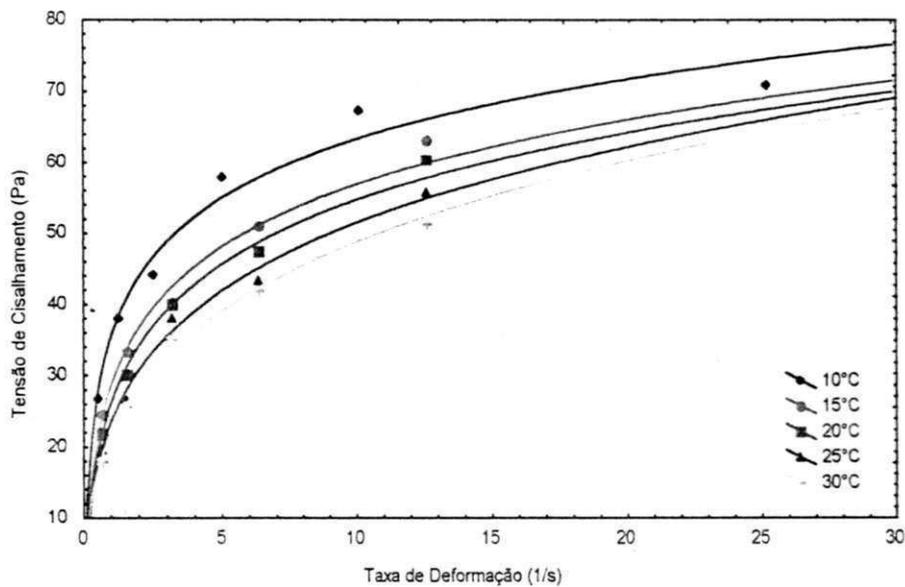
Comparando-se os parâmetros estatísticos dos ajuste para os três modelos (Tabelas 4.4, 4.5, e 4.6), observa-se que o modelo de Herschel-Bulkley proporcionou os melhores ajustes em toda faixa de temperatura estudada, apresentando os maiores valores para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e valores próximos a zero para o qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Em seguida o modelo da Lei da Potência apresentou os maiores  $R^2$  e por último o modelo de Casson com os menores valores de  $R^2$ .

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 tem-se a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, para a polpa de cupuaçu em todas as condições estudadas, representando as curvas de ajuste para o modelo Herschel-Bulkley.

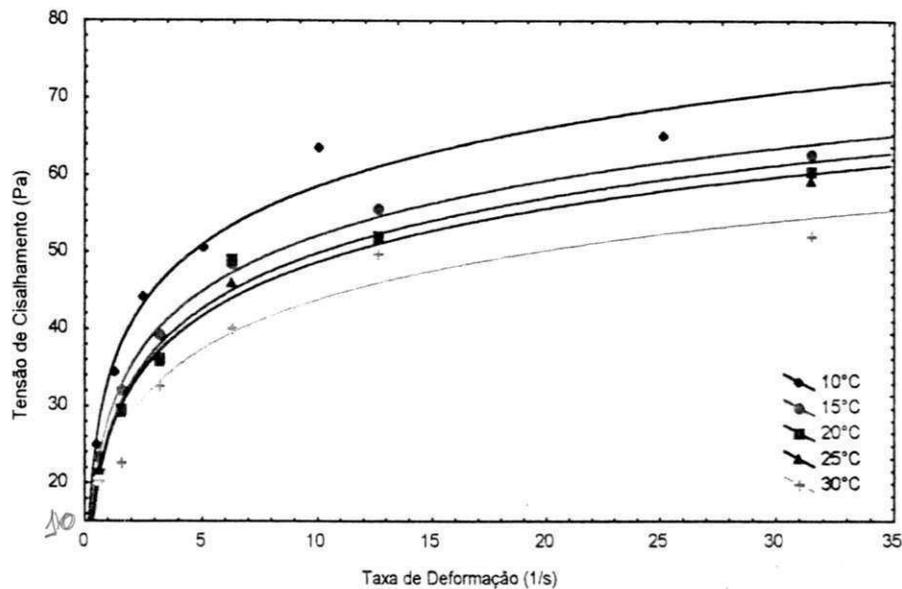
Comparando os resultados apresentados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, observa-se que, assim como se vê nas curvas de ajuste pelos modelos de Casson e Ostwald-de-Waelle (Figuras 4.1 a 4.6), as curvas referentes ao material 9°Brix mantêm um distanciamento semelhante em toda escala de taxa de deformação. No caso do material integral a curva representando as amostras a 10°C se distancia em relação as demais. As curvas de 15 a 30°C convergem com o aumento da taxa de deformação. Esta convergência não se repete nas amostras peneiradas, cujas curvas mantêm um afastamento constante em todas as taxas de deformações estudadas, repetindo o comportamento das curvas a 9°Brix. Igualmente neste caso a curva representando o material integral se distanciou em relação às curvas referentes as demais temperaturas.



**Figura 4.7** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu a 9°Brix descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley.



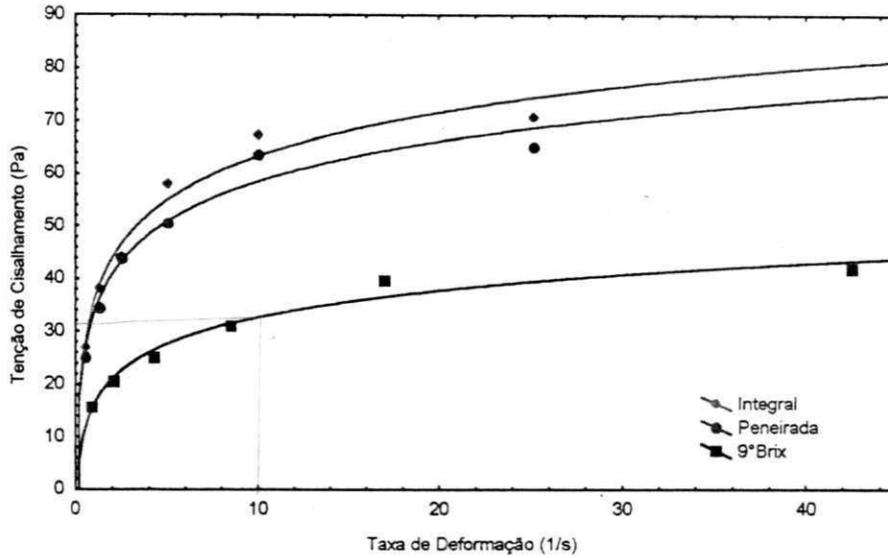
**Figura 4.8** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu integral descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley.



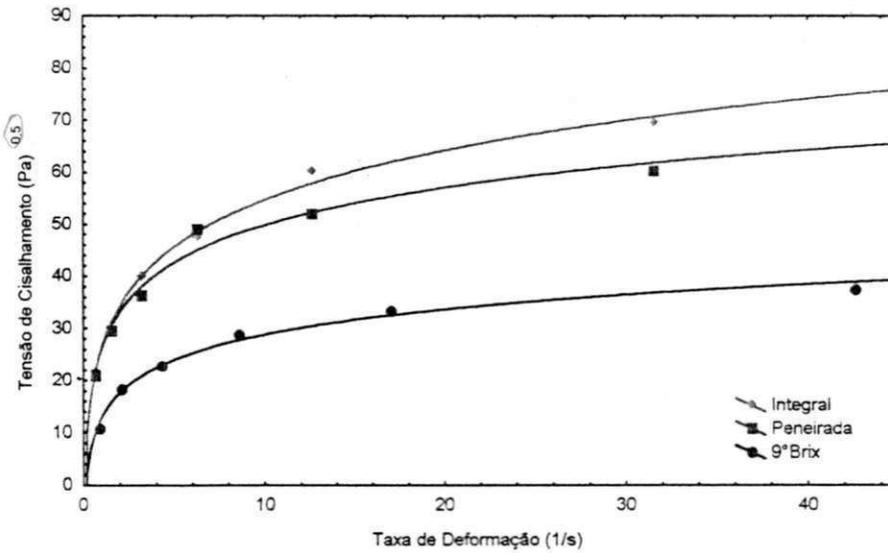
**Figura 4.9** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para a polpa de cupuaçu peneirada descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley.

As Figuras 4.10 a 4.12 representam a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os materiais 9°Brix, peneirado e integral nas temperaturas de 10, 20 e 30°C, ajustados pelo modelo de Herschel-Bulkley.

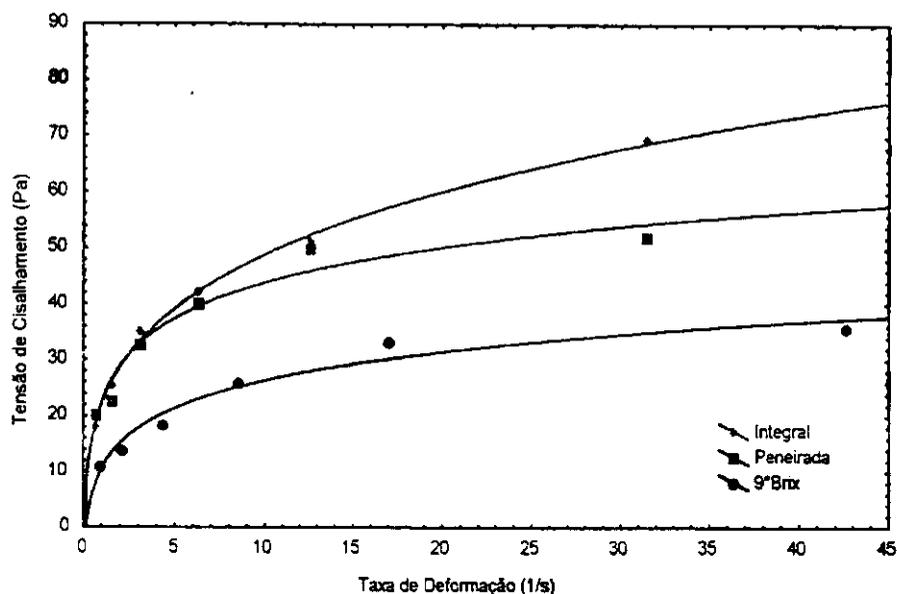
Comparando o conjunto de curvas das Figuras 4.10 a 4.12, observa-se que as curvas referentes ao material a 9°Brix se destacam numa posição bem abaixo das curvas dos materiais integral e peneirado, denotando a influência dos sólidos solúveis nas características reológicas do material. Observa-se que houve um distanciamento da curva referente ao material peneirado em relação ao integral, com o aumento da temperatura, indicando que a influência da temperatura na viscosidade do produto é afetada pelo conteúdo de sólidos.



**Figura 4.10** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os materiais, 9°Brix, peneirado e integral, a 10°C. Com ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley.



**Figura 4.11** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação, para os materiais 9°Brix, peneirado e integral, a 20°C. Com ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley.



**Figura 4.12** - Relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação para os três materiais. 9°Brix, peneirado e integral, a 30°C. Com ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley.

### 4.3 - Viscosidade aparente

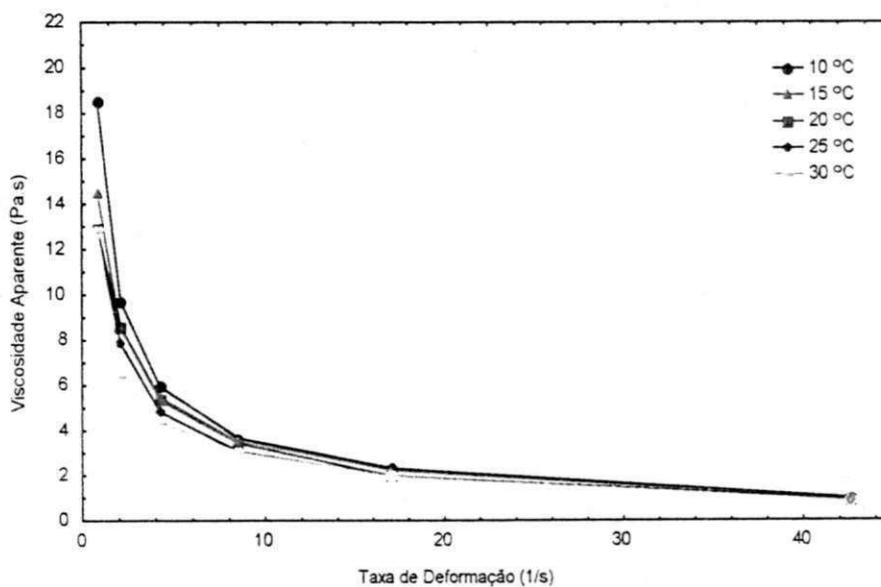
Os valores de viscosidades aparentes foram obtidos a partir do modelo de Herschel-Bulkley, para uma taxa de deformação fixa de  $20s^{-1}$ , e foram graficados em função da taxa de deformação.

Nas Figuras 4.13 a 4.15, estão representados os dados da viscosidade aparente em função da taxa de deformação da polpa de cupuaçu a 9°Brix, peneirada e integral.

Observa-se pela posição relativa das curvas uma diminuição nas viscosidades aparentes com o aumento da temperatura para todas as amostras. Este comportamento tem tendência similar aos encontrados por VIDAL (2000)

ao trabalhar com polpa de manga despectinizada na mesma faixa de temperatura e VIEIRA (1995), para suco de laranja concentrado.

→ Observa-se nestas figuras que os valores da viscosidade aparente para taxa de deformação  $10 \text{ s}^{-1}$ , nas diversas temperaturas apresentam valores muito próximos entre si em todas as amostras. Observa-se ainda que há um decréscimo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, caracterizando o material estudado como fluido pseudoplástico.



**Figura 4.13** - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade aparente para a polpa de cupuaçu a 9°Brix .

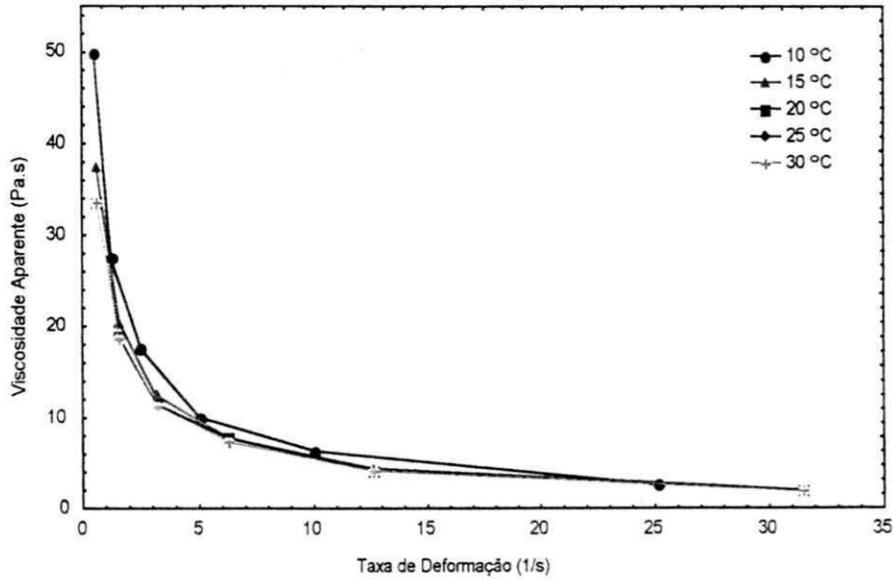


Figura 4.14 - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade aparente para a polpa de cupuaçu peneirada.

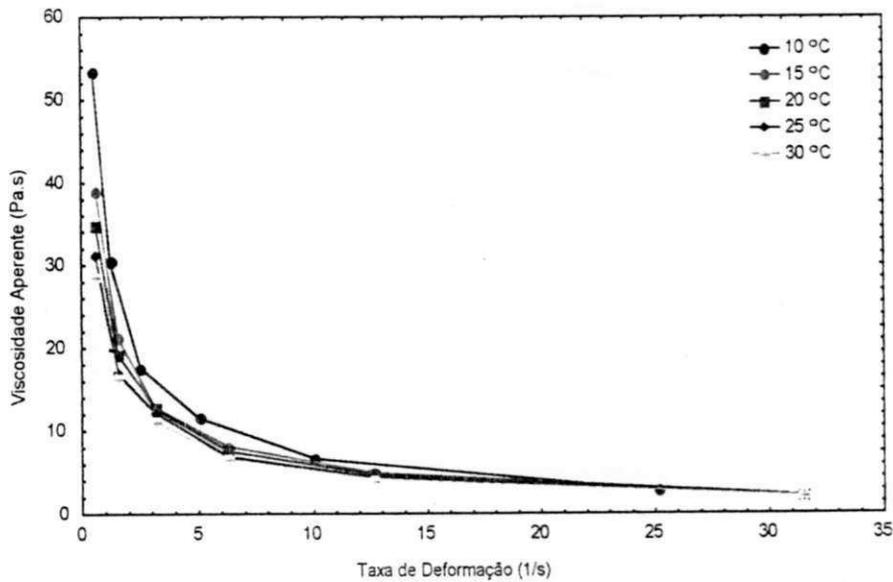


Figura 4.15 - Efeito da taxa de deformação sobre a viscosidade aparente para a polpa de cupuaçu integral.

### 4.3.1 - Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente

A temperatura é um fator de reconhecida influência sobre o comportamento reológico dos alimentos, esta influência deve ser levada em conta no dimensionamento de equipamentos e estudos de processos que envolvem variações térmicas em qualquer de suas etapas.

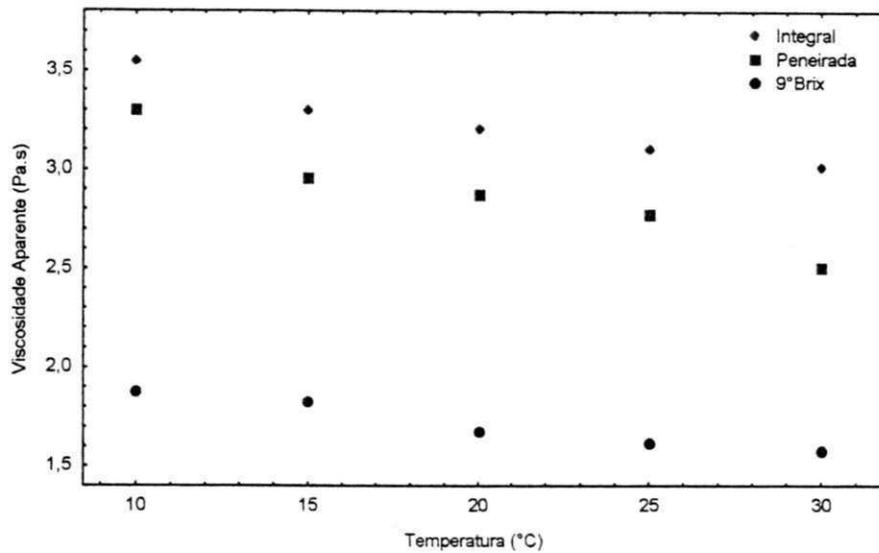
Foram calculados valores de viscosidades aparentes a partir do modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, no caso, o modelo de Herschel-Bulkley, para uma taxa de deformação de  $20\text{s}^{-1}$ , estes valores estão relacionados na Tabela 4.8. Verifica-se nesta tabela que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura em todas as amostras.

Comparando as viscosidades aparentes do material integral e peneirado observa-se que a eliminação do particulado insolúvel, através do peneiramento, resultou na redução do valor médio da viscosidade aparente em 10,88%. Enquanto que, com a redução no teor de sólidos solúveis de  $12^\circ\text{Brix}$  (material integral), para  $9^\circ\text{Brix}$ , houve uma diminuição na viscosidade média aparente de 47% em relação ao material integral, indicando a influência dos sólidos solúveis na viscosidade aparente da polpa de cupuaçu. Observa-se ainda que os maiores valores da viscosidade aparente correspondem a polpa de cupuaçu integral, seguida da peneirada e por último a  $9^\circ\text{Brix}$ . Resultados semelhantes foram obtidos por SILVA (1999), trabalhando com suco de acerola a várias concentrações de  $^\circ\text{Brix}$ .

**Tabela 4.8** - Valores da viscosidade aparente calculados para a taxa de deformação de  $20\text{s}^{-1}$  a partir dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu à  $9^\circ\text{Brix}$ , peneirada e integral.

<i>T(°C)</i>	<i>Viscosidade aparente (Pa.s)</i>		
	<i>9°Brix</i>	<i>Peneirada</i>	<i>Integral</i>
10	1,8842	3,2978	3,5453
15	1,8325	2,9576	3,3033
20	1,6762	2,8833	3,2109
25	1,6231	2,7769	3,1118
30	1,5783	2,5108	3,0154

Na Figuras 4.16 estão representados graficamente os dados da Tabela 4.8, isto é, as viscosidades aparentes em função da temperatura, calculadas a partir do modelo de Herschel-Bulkley, para a taxa de deformação de  $20\text{s}^{-1}$ . Observa-se que, para uma taxa de deformação fixa, a viscosidade aparente diminui à medida que aumenta a temperatura.



**Figura 4.16** - Viscosidade aparente da polpa de cupuaçu em função da temperatura.

Utilizando-se a equação de Arrhenius (Eq. 2.20), através de ajuste não-linear, determinou-se os valores da energia de ativação ( $E_a$ ) e da constante ( $\eta_0$ ) para a polpa de cupuaçu à 9°brix, peneirada e integral, para a faixa de temperatura de 10°C a 30°C. Os parâmetros desta equação (Tabela 4.8) foram obtidos dos dados de viscosidade aparente em função da temperatura calculados a partir do modelo de Herschel-Bulkley para uma taxa de deformação de  $20s^{-1}$ .

**Tabela 4.9-** Parâmetros da equação de Arrhenius para a polpa de cupuaçu à 9°Brix, peneirada e integral.

<i>Amostras</i>	$\dot{\gamma}$ ( $s^{-1}$ )	$E_a$ (kcal/gmol)	$\eta_o$ (Pa.s)	$R^2$
<i>9°Brix</i>	20	1,6458	0,1015	0,9618
<i>Peneirada</i>	20	2,0755	0,0814	0,9369
<i>Integral</i>	20	1,3349	0,3265	0,9625

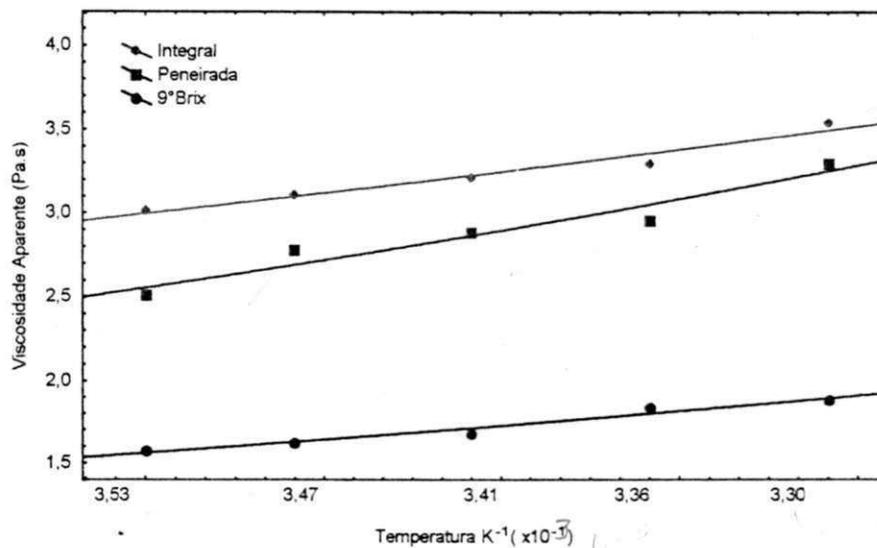
Como pode ser observado na Tabela 4.8, a amostra peneirada, que apresenta o menor índice de comportamento de fluxo ( $n$ ), (Tabela 4.6) possui o maior valor para a energia de ativação, confirmando as observações feitas por HOLDSWORTH (1971) ao examinar os valores de energia de ativação para sucos e purês de frutas pseudoplásticos, o qual verificou esta mesma relação. Observa-se ainda que a amostra peneirada apresentou o maior valor para a energia de ativação, seguida da amostra 9°Brix e integral que apresentou o menor valor.

Analisando os resultados da Tabela 4.8, verifica-se que a redução no teor de sólidos insolúveis pelo peneiramento provocou o aumento de 55% no valor da energia de ativação em relação ao produto integral. A redução no teor de sólidos solúveis (°Brix) também provocou o aumento de 23,29% na energia de ativação do material a 9°Brix. VIEIRA (1996) estudando suco de laranja a diferentes concentrações, observou que os valores de energia de ativação diminuíram com a concentração de 43 e 53°Brix. IBARZ *et al.* (1994) obtiveram resultados semelhantes.

A Figura 4.17 representa o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente ( $\eta_a$ ), calculada a partir do modelo de Herschel-Bulkley, para a taxa de

deformação  $20\text{s}^{-1}$ . Os pontos marcados representam os valores calculados pelo modelo de Herschel-Bulkley, enquanto que as linhas contínuas representam o ajuste pela equação de Arrhenius. Verifica-se que a equação de Arrhenius ajustou-se bem aos dados da viscosidade aparente em função do inverso da temperatura.

→ Observa-se que o aumento da temperatura provoca a diminuição da viscosidade, visto que, conforme se vê na Figura 4.17 há um aumento da viscosidade com o inverso da temperatura.



**Figura 4.17** - Viscosidade aparente da polpa de cupuaçu, calculada para a taxa de deformação  $20\text{s}^{-1}$ , em função da temperatura ajustada com a equação de Arrhenius.

## 5 - CONCLUSÕES:

- A polpa integral de cupuaçu utilizada neste trabalho estava em conformidade com os padrões de identidade e qualidade do Ministério da Agricultura e Abastecimento.
- O índice de comportamento de fluxo ( $n$ ), determinado através dos modelos reológicos de Ostwald-de-Waele e de Herschel-Bulkley, apresentaram valores menores que a unidade em todas as condições, o que define a polpa de cupuaçu estudada como um fluido não-newtoniano, com comportamento independente do tempo, enquadrando-se na categoria pseudoplástico.
- Dentre os modelos reológicos utilizados para descrever o comportamento da polpa de cupuaçu nas condições integral, peneirada e 9°Brix, o modelo de Herschel-Bulkley, demonstrou ser o que melhor se ajustou aos dados experimentais, apresentando os maiores valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), seguido do modelo da Lei da Potência e por último o modelo de Casson.
- Embora o modelo Herschel-Bulkley tenha se ajustado melhor aos dados experimentais, o modelo da Lei da Potência e de Casson também se ajustaram aos dados com parâmetros aceitáveis para todas as condições estudadas.
- Para a taxa de deformação de  $20s^{-1}$ , a viscosidade aparente ( $\eta_a$ ) diminui à medida que a temperatura aumenta.

- 
- A equação de Arrhenius pode ser utilizada na estimativa dos dados de viscosidade aparente da polpa de cupuaçu integral, 9°Brix e peneirada, na faixa de temperatura de 10° a 30°C.

---

**6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ADORNO, R.A.C. **Reologia de sucos de frutas tropicais: manga, maracujá, mamão e goiaba.** Campinas: UNICAMP, 1997. 178p. (Dissertação de Mestrado).

ANTONIETTO, E.; FERNANDES, L.M.; MENDES, E.S.; BARROS, S.T.D. Estudo da reologia de suco de frutas após sua concentração num evaporador rotativo a vácuo. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 50, 1998, Natal, RN. **Resumos...**, Natal: UFRN/ SBPC, 1998, P.173

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. (A.O.A.C.) **Official methods of analysis.** WILLIAMS, S. (Ed.) 14. Ed. Arlington, 1984. 1141p.

BARBOSA, W. C.; NAZARÉ, R.F.R; NAGATA, I. **Estudo tecnológico de frutas da Amazônia.** Belém, CPATU, 1978. 19p (Comunicado Técnico 3).

BERBERT, P.R.F. Determinação do teor de ácidos graxos e características físicas das gorduras das sementes de *Theobroma grandiflorum* e do *Theobroma bicolor* e comparação com a gordura do *Theobroma cacao*. **Revista Theobroma**, v.11, n.2, p.91-98, 1981.

BLEINROTH, E. W. **Tecnologia de pós-colheita de frutas tropicais.** Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos., 1988. 200p.

---

BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHFOOT, E.N. Fenômenos de Transporte Editorial Reverté, S.A. 1960.

BHATTACHARYA, S.; RASTOGI, N.K. Rheological properties of enzyme-treated mango pulp. **Journal of Food Engineering**, v.36, p.249-262, 1998.

BRASIL. Instrução normativa nº 1, de 7 de janeiro de 2000. Estabelece o Regimento Técnico para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para polpa de fruta. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília DF, 10 jan. 2000. Seção 1, n.6, p.54-58.

BRASIL, I.M.; GUIMARÃES, A.C.L. **Curso de especialização em tecnologia de processamento de sucos e polpas tropicais: química e bioquímica do processamento**. Brasília: ABEAS, 1998. v.5. 109p.

BRANCO, I.G.; TELES-ROMERO, J.; GASPARETTO, C.A. Reologia de suco de laranja concentrado a baixas temperaturas. In: I CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 1, 1995, Campinas. **Anales...** Valencia: UPV, 1995.

CABRAL, L.M.C.; FURTADO, A.A.L. Processamentos de frutas. (ed) 1. **Curso de procesamento de frutas: polpa e suco de frutas**. Brasília: EMBRAPA, 1997. Cap. 4, p.74-82.

CALZAVARA, B.B.G.; MÜLLER, C.H.; KAHWAGE, O.N.C. **O cupuaçuzeiro: cultivo, beneficiamento e utilização do fruto**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1984. 101p. (Doc. 32).

CASSON, N., 1959, A flow equation for pigment-oil Suspensions of the printing ink type, in **Rheology of Disperse Suspensions**, C.C. Mill (Ed), Pergamon press, New York.

CHAAR, J.M. **Composição do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e conservação do seu néctar por meios físicos e químicos**, Rio de Janeiro: UFRJ, 1980. 87p. (Dissertação de Mestrado).

CHAVES, J.B.P. **Análise sensorial: histórico e desenvolvimento**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1993, 31p.

CHIAMPO, F.; TASSO, M.; OCCELLI, A.; CONTI, R. Rheological properties of fruit pures. **Industria Conserve**, Torino, v.3, p. 331-336, 1996.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1990. 320p.

CONCEIÇÃO, R.S. **Comportamento reológico da polpa de goiaba**. Campina Grande: UFPB, 2000. 68p. (Dissertação de Mestrado).

CZYHRINCIW, N. Tropical fruit technology. **Advances in food Research**, New York, v.17, p.153-208, 1969.

DURAN, L.; COSTELL E. Rheology of apricot puree: characterization of flow. **Journal of Texture Studies**, v.13, p.43-58, 1982.

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de Alimentos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, Atheneu, 1994, 652p.

FAZIER, W.C.; WEATHOFF, D.C. **Microbiologia de los alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1993. 681p.

GONÇALVES, J.R. Introdução à reologia de alimentos fluidos.(ed) 1. **Reologia e textura em alimentos**. Campinas: ITAL, 1989. cap.2, p.6-11.

GARCIA, R.; RIVERA, J.; ROLZ, C. Rheological properties of some tropical fruit products and their enzymic clarification. In: **INT. CONG. FOOD SCI & TECH.**, 4, v.2, p.18-26, 1974.

GASPARETTO, C.A.; GEHRKE, T. **Reologia**. Campinas: UNICAMP, 1995. 20p. Apostila.

GUNJAL, B.B. WAGHMARE, N.J. Flow Characteristics of Pulp, Juice and nectar of "Baneshan" and "Neelum" mangoes. **J. of Food Sci. Tech.** v.24, p.20-23, 1987.

---

HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v.2, n.4, p.393-418, 1971.

IBARZ, A.; GONÇALVES, C.; ESPLUGAS, S. Rheology of clarified fruit juice: Orange juices. **Journal of Food Engineering**, Lleida, v.2, n.4, p.485-494, 1994.

IBARZ, A.; GONÇALVES, C.; ESPLUGAS, S. Rheological behaviour of apple juice and pear juice and their concentrates. **J. Food Engineering**, v.6, n.8, p.330-333, 1987.

IBARZ, A.; PAGAN, J.; MIGUELSANZ, R. Rheology of clarified fruit juices: II - blackcurrant juices. **Journal of Food Engineering**, v.15, n.1, p.63-73, 1992.

IBARZ, A.; GONZALEZ, C.; ESPULGAS, S.; VICENTE, M. Rheology of clarified fruit juices: I - peach juices. **Juornal of Food Engineering**, v.15, n.1, p.49-61, 1992.

JAY, J.M. **Modern food microbiology**. 4ed. New York: Nostrand Reinhold, 1992. 642p.

JIMENES, G., DURAN, L. Propriedades reológicas de produtos derivados de frutas y tomate. **Revista de Agroquímica y Tecnologia de Alimentos**, Valência, v.19 n.2, p.203-216, 1979.

KEFFORD, J.F.; CHANDLER, B.V. **The chemical constituents of citrus fruits**. New York: Academic Press, 1970. 225p.

LARA, A.B.W.H.; NAZÁRIO, G.; ALMEIDA, M.E.W.; PREGNOLATO, W. **Normas analíticas do Instituto Adolfo lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 2.ed. São Paulo: Melhoramentos, 1976. V.1, 371p.

MACHADO, J.C.V. **Reologia e viscometria**. PETROBRAS, 1996. 73p.Apostila.

MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; UDAYASANKAR, K. Some physical properties of tamarind juice concentrates. **Journal of Food Engineering**, v.13, n.4. p. 241-258, 1991.

MIRANDA, R.M. **Conservação da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) com o uso do frio**. Manaus: INPA/Fund. Univ. do Amazonas. 1989. 104p. (Dissertação de Mestrado).

MITSCHKA, P. Simple conversion of brookfield RVT: readings into viscosity functions. **Rheol. Acta**, Prague, v.21, p.207-209, 1982.

MIZRAHI, S. BERK, Z. Flow behavior of concentrated orange juice. **Journal of Texture Studies**, v.1, p.342-355, 1970.

MORI, E.E.M. Introdução à reologia de alimentos fluidos. **Reologia e textura em alimentos**. (ed) 1. Campinas : ITAL, 1989. cap.4, p.17-42.

---

MÜLLER, C.H.; FIGUEIRÊDO, F.J.C. **A cultura do cupuaçu**. Brasília: EMBRAPA - SPI, 1995. 61p. ( coleção plantar; 24).

NAGY, S.; CHEN, C. S.; SHAW, P. E. Fruit juice processing technology. Flórida: **Agscience, Inc.** 1993. 713p.

NAZARÉ, R.F.R. ; BARBOSA, W.C.; VIEGAS, R.M.F. **Processamento das sementes de cupuaçu para a obtenção do cupulate**. Belém: EMBRAPA/CPATU, (Boletim de Pesquisa n.108).1990, 38p.

OLIVEIRA, R.P.S.; MENEGALLI, F.C.; Comportamento reológico do suco de acerola. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS, 2, 1998, Bahia Blanca, Argentina. **Anales...** Bahia Blanca: PALPIQUI, 1998. CD Rom.

OLIVEIRA, M.L.S. **Contribuição ao aproveitamento industrial do cupuaçu** (*Theobroma grandiflorum Schum*). Fortaleza: UFC, 1981. (Dissertação de Mestrado).

PEARSON, D. **The chemical analysis of food**. London: J. and A. CHURCHILL, 6. Ed, 1970.

OLIVEIRA, M.L.S. **Caracterização física e físico-química da fruta cupuaçu** (*Theobroma grandiflorum*) Revista Tecnológica, Belém, v.2, n.1, p. 227-230, jan./jun. 1981.

---

QUEIROZ, A.J.M. **Estudo do comportamento reológico dos sucos de abacaxi e manga.** Campinas: UNICAMP, 1998, 170p. (Tese de Doutorado).

QUEIROZ, A.J.M.; BEZERRA, J.R.V.; GASPARETTO, C.A. Comportamento reológico de sucos de manga despectinizados com diferentes teores de sólidos insolúveis suspensos. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.8, n.4, p.209-218, out./dez. 2000.

RAO, M.A. ; RIZVI, S.S. **Engineering properties of foods.** New York: Marcel Dekker, p. 1-47, 1986.

RAO, M.A. Rheology of liquid foods: a review. **Journal of Texture Studies**, v.8, n.2, p. 135-68, 1977.

RAO, M.A.; OTOYA PALOMINO, L.N.; BERNHARDT, L.W. Flow properties of tropical fruit purees. **Journal of Food Science**, v.39, p.160-161. 1974.

RAO, M.A.; ANANTHESWARAN, R.C. Rheology of fluids in food processing. **Food Technology**, New York, v.36, n.2, p.116-126, 1982.

RAO, M.A.; COOLEY, H.J.; VITALI, A.A. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. **Food Technology**, New York, v.38, n.3, p.113-119, 1984.

---

RAO, M.A.; PALOMINO, N.O. Flow properties of tropical fruit purees. **Journal of Food Science**, v.39, n.1, p.160 - 161, 1974.

RODRIGUES, J. A.S.; PINHEIRO, R.V.R.; MANICA, I.; CASALI, V. W.D.; CONDÊS, A.R. Comportamento de dez variedades de manga (*Mangifera indica*) em Viçosa e Visconde do Rio Branco. **Ceres**, v.24, n.136, p.580-595, 1977.

SAENZ, C.; COSTELL, E. Comportamento reológico de produtos de limón: Influência de la temperatura y concentracion. **Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos**, v.26, n.4, p.581-588, 1986.

SANTOS, A.I. CONDURU, J.M.P. Comparação de rendimento entre frutos de duas variedades de cupuaçuzeiros. Belém: IPEAN, 1972 (**Comunicado Técnico, 31**).

SARAVACOS, G.D. Effect of temperature on viscosity of fruits juice and purees. **Journal of Food Science**, v.35, p.122-125, 1970.

SILVA, F.C. **Reologia do suco de acerola: efeito da concentração e temperatura**. Campina: UNICAMP, 1999, 110p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, A.Q., SILVA, H. Teores de nutrientes em cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) Nota Técnica. In: Congresso Brasileiro de Fruticultura, 8, 1986, p.269-272.

---

SISSOM, LEIGHTON E.; PITTS, DONALD R. **Fenômenos de Transporte**. Tradução por Adir M. Luiz. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1988, 756p. Tradução de: **Elements of Transport Phenomena**.

SOUZA, A.G.C.; SILVA, S.E.L.; TINOCO, P.B. GUMARÃES, R.R.; SÁ SOBRINHO, A.F. **Cadeia produtiva do cupuaçu no Amanoza**. Manaus: EMBRAPA-CPAA/SEBRAE-AM, 1998. 35p. (Documentos 15 SEBRAE-AM, Série Agronegócios).

SOLER, M.P.; RADOMILLE, L.R.; TOCCHINI, R.P. Processamento. In: SOLER, M. P. et.al. **Industrialização de frutas**. Campinas: ITAL, 1988. p.77-131. (ITAL, Manual Técnico).

TELIS, J.R.: **Hidrodinâmica e transferência de calor do escoamento laminar de fluidos não - newtonianos em tubos**. Campinas: UNICAMP, 1992 (Tese de doutorado).

TORREZAN, R. Processamento de frutas. **Curso de Processamento de Frutas**. Brasília: EMBRAPA-CTAA/SEBRAE, 1997. cap.4. p.38-51.

TANNEBAUM, S.R.; YOUNG, R.R.; ARCHER, M.C. Vitaminas y minerales. In: FENNEMA, O.R. **Química de los Alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1993. cap.7. p.537-601.

VENTURIERI, G.A. **Cupuaçu: a espécie, sua cultura, usos e processamento**. Belém: Clube do cupu, 1993. 108p.

---

VIDAL, J.R.M. **Estudo reológico de suco de manga - Efeito dos sólidos solúveis e insolúveis**. Campinas: UNICAMP, 1997. 77p. (Dissertação de Mestrado).

VIDAL, J.R.M.B. **Comportamento reológico da polpa de manga**. Campinas: UNICAMP, 2000., 159p. (Tese de Doutorado).

VIEIRA, J.A.G. **Propriedades termofísicas e convecção laminar em tubos de suco de laranja**. Campinas: UNICAMP, 1995. 87p. (Tese de Doutorado).

VITALI, A.A.; ROIG, S.M., RAO, M.A. Viscosity behavior of concentrated passion fruit juice. **Confruta**, v.19, n.5, p.201-206, 1974.

VITALI, A.A., RAO, M.A. Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. **Journal Texture Studies**. v.13,n.3 p.275-289. 1982.

ZADERNOWSKI, R.; MARKIEWICZ, K.; NESTEROWICZ, J.; PIERZYNOWSKA-KORNIAK, G. Physcal and chemical characteristics of pulpy juices. **Fruit Processing**, Hachenburg, Germany, v.7, n.11, p.441-447, 1997.

---

## 7 - SUGESTÕES

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Estudar o comportamento reológico de polpas de cupuaçu concentradas acima de 12 °Brix .
- Analisar a influência da pectina na reologia da polpa de cupuaçu.
- Verificar a reologia da polpa de cupuaçu em faixas mais amplas de temperatura e taxas de deformação/tensão de cisalhamento.

## APÊNDICE A

**Tabela A1** - Valores obtidos experimentalmente para a taxa de deformação e tensão de cisalhamento, para a polpa de cupuaçu a 9°Brix.

T (°C)	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (Pa)
10	0,8510	15,7920
	2,1275	20,6330
	4,2550	25,2625
	8,5100	31,2080
	17,0200	39,6445
	42,5500	42,0180
15	0,8510	12,2905
	2,1275	18,3065
	4,2550	23,2415
	8,5100	30,1505
	17,0200	37,6000
	42,5500	40,2555
20	0,8510	10,9745
	2,1275	18,2125
	4,2550	22,7245
	8,5100	29,0225
	17,0200	33,5580
	42,5500	37,4120
25	0,8510	10,9275
	2,1275	16,6850
	4,2550	20,5625
	8,5100	26,0850
	17,0200	33,2995
	42,5500	37,2005
30	0,8510	10,9275
	2,1275	13,7005
	4,2550	18,6120
	8,5100	25,8500
	17,0200	33,2995
	42,5500	35,8375

**Tabela A2** - Valores obtidos experimentalmente para a taxa de deformação e tensão de cisalhamento, para a polpa de cupuaçu peneirada.

T° (C)	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (Pa)
10	0,5030	25,0745
	1,2575	34,4745
	2,5150	44,0625
	5,0300	50,5250
	10,0600	63,6380
	25,1500	65,2125
15	0,6290	23,5000
	1,5725	32,1245
	3,1450	39,2920
	6,2900	48,5980
	12,5800	55,8125
	31,4500	62,8625
20	0,6290	21,1500
	1,5725	29,5630
	3,1450	36,2370
	6,2900	48,9505
	12,5800	52,0995
	31,4500	60,5595
25	0,6290	21,1500
	1,5725	29,5630
	3,1450	36,2370
	6,2900	48,9505
	12,5800	52,0995
	31,4500	60,5595
30	0,6290	21,1500
	1,5725	29,1870
	3,1450	35,6495
	6,2900	46,0130
	12,5800	51,7000
	31,4500	59,3375

**Tabela A3** - Valores obtidos experimentalmente para a taxa de deformação e tensão de cisalhamento, para a polpa de cupuaçu integral.

T°C	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\tau$ (Pa)
10	0,5030	26,8370
	1,2575	38,1875
	2,5150	44,2505
	5,0300	57,9745
	10,0600	67,3745
	25,1500	70,8995
15	0,6290	24,4870
	1,5725	33,2990
	3,1450	40,3450
	6,2900	51,1125
	12,5800	63,2620
	31,4500	70,6880
20	0,6290	21,7845
	1,572	30,1505
	3,1450	39,9500
	6,2900	47,5875
	12,5800	60,3245
	31,4500	69,7245
25	0,6290	19,5755
	1,5725	26,6255
	3,1450	38,1875
	6,2900	43,4750
	12,5800	55,8125
	31,4500	69,7245
30	0,6290	17,9305
	1,5725	25,6620
	3,1450	35,0620
	6,2900	42,1120
	12,5800	51,3005
	31,4500	69,3250

## APÊNDICE B

**Tabela B1** - Valores obtidos para a viscosidade aparente, calculados a partir do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu a 9°Brix

T (°C)	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\eta_a$ (Pa.s)
10	0,5030	17,4725
	1,2575	10,0672
	2,5150	6,2072
	5,0300	3,6941
	10,0600	2,1446
	25,1500	1,0164
15	0,5030	14,0155
	1,2575	8,9776
	2,5150	5,7644
	5,0300	3,5202
	10,0600	2,0792
	25,1500	1,0004
20	0,5030	13,8166
	1,2575	8,4953
	2,5150	5,3707
	5,0300	3,2470
	10,0600	1,9043
	25,1500	0,2481
25	0,5030	12,4100
	1,2575	7,8812
	2,5150	5,0630
	5,0300	3,1010
	10,0600	1,8395
	25,1500	0,8912
30	0,5030	11,1758
	1,2575	7,2995
	2,5150	4,7673
	5,0300	2,9637
	10,0600	1,7829
	25,1500	0,8794

**Tabela B2** - Valores obtidos para a viscosidade aparente, calculados a partir do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu a peneirada.

T° (C)	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\eta_a$ (Pa.s)
10	0,5030	51,0254
	1,2575	28,3784
	2,5150	17,2038
	5,0300	10,1095
	10,0600	5,8087
	25,1500	2,7222
15	0,6290	37,1297
	1,5725	20,8793
	3,1450	12,7199
	6,2900	7,5004
	12,5800	4,3205
	31,4500	2,0298
20	0,6290	35,1832
	1,5725	20,0560
	3,1450	12,2916
	6,2900	7,2779
	12,5800	4,2052
	31,4500	1,9816
25	0,6290	33,0445
	1,5725	19,0689
	3,1450	11,7482
	6,2900	6,9813
	12,5800	4,0444
	31,4500	1,9107
30	0,6290	29,0389
	1,5725	16,9894
	3,1450	10,5292
	6,2900	6,2827
	12,5800	3,6508
	31,4500	1,7300

**Tabela B3** - Valores obtidos para a viscosidade aparente, calculados a partir do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu integral.

T° (C)	$\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> )	$\eta_a$ (Pa.s)
10	0,5030	54,6337
	1,2575	30,4421
	2,5150	18,4703
	5,0300	10,8600
	10,0600	6,24260
	25,1500	2,92680
	15	0,6290
1,5725		21,6675
3,1450		13,4832
6,2900		8,11170
12,5800		4,76440
31,4500		2,29540
20		0,6290
	1,5725	20,0094
	3,1450	12,6681
	6,2900	7,72970
	12,5800	4,59620
	31,4500	2,24690
	25	0,6290
1,5725		17,9646
3,1450		11,4952
6,2900		7,15570
12,5800		4,36700
31,4500		2,22330
30		0,6290
	1,5725	16,6444
	3,1450	10,6621
	6,2900	6,71120
	12,5800	4,16960
	31,4500	2,18970