



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO  
REOLÓGICO DA POLPA DE CUPUAÇU  
(*Theobroma grandiflorum*)  
EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS**

**ARIANNE DANTAS VIANA**

**ITAPETINGA - BAHIA - BRASIL  
FEVEREIRO - 2010**

**ARIANNE DANTAS VIANA**

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA  
POLPA DE CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*)  
EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia-UESB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração em Engenharia de Processos de Alimentos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. D.Sc. Modesto Antonio Chaves

Co-Orientador: Prof. D.Sc. Luciano Brito Rodrigues

**ITAPETINGA – BAHIA - BRASIL  
FEVEREIRO- 2010**

634.7 V667p	<p>Viana, Arianne Dantas.</p> <p>Propriedades termofísicas e comportamento reológico da polpa de cupuaçu (<i>theobroma grandiflorum</i>) em diferentes concentrações e temperaturas. / Arianne Dantas Viana. – Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2010. 99p.</p> <p>Dissertação do Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos. Sob a orientação do Prof. DSc. Modesto Antonio Chaves e co-orientação do Prof. DSc. Luciano Brito Rodrigues.</p> <p>1. Cupuaçu – Propriedades termofísicas – Reologia. 2. Frutas tropicais – Cupuaçu. 3. Cupuaçu – Polpa – Industrialização. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. II. Chaves, Modesto Antonio. III. Rodrigues, Luciano Brito. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;"><b>CDD(21): 634.7</b></p>
----------------	---

#### **Catálogo na Fonte:**

Cláudia Aparecida de Souza – CRB 1014-5ª Região  
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por assunto:

1. Cupuaçu – Propriedades termofísicas – Reologia
2. Frutas tropicais – Cupuaçu.
3. Cupuaçu – Polpa – Industrialização
4. *theobroma grandiflorum* – Comportamento reológico



## DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**Título:** “PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA POLPA DE CUPUAÇU (*Theobroma grandiflorum*) EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS”

**Autora:** ARIANNE DANTAS VIANA

**Orientador:** Prof. DSc. Modesto Antonio Chaves

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Luciano Brito Rodrigues

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS DE ALIMENTOS, pela Banca Examinadora.

Prof. Luciano Brito Rodrigues, DSc., PRESIDENTE / UESB

Profª. Renata Cristina Ferreira Bonomo DSc., UESB

Prof. Ricardo de Araújo Kalid, DSc., UFBA

Data da Realização: 26 de fevereiro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico aos meus pais, Almino e Fátima, aos meus irmãos Almino e Arielle e a minha querida e grande amiga, Vila, sempre presentes nas minhas conquistas.

## AGRADECIMENTOS

- À Deus, por abençoar sempre o meu caminho.
- Aos meus pais Almino, Fátima e minhas grandes amigas Vila e Vilma pelo amor, carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.
- Aos meus irmãos, Almino e Arielle pelo apoio incondicional.
- Ao Prof. Dr. Modesto Antônio Chaves pela orientação, paciência e atenção dedicada durante o período de realização deste trabalho.
- Aos professores Dr. Luciano Brito, Dr<sup>a</sup>. Cristiane Martins Veloso, Dr<sup>a</sup>. Sibelli Passini Ferraz, Dr<sup>a</sup>. Carmem e demais professores pelo auxílio na realização das análises, disponibilizando os seus laboratórios, além de sugestões sobre o trabalho.
- À (FAPESB) pela concessão da bolsa de Mestrado.
- À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela oportunidade da realização do curso de Mestrado.
- Ao Prof. Célio Kersul do Sacramento da – UESC/Ilhéus pelo fornecimento das polpas de cupuaçu utilizadas nos experimentos.
- À Ellen, Eliza, Laoan, Rúbner, Talita, Vinícius e Rosáli pela disposição em ajudar nas análises.
- À Bárbara e Léo, funcionários administrativos exemplares, bastante prestativos e muito educados.
- Ao seu Raimundo, Aristídes e demais funcionários pela disposição em manter os laboratórios sempre organizados.
- Aos meus colegas de turma Angélica, Maycon, Christian, Viviane, Ravie, Juca, Helmo, além dos colegas mais recentes, principalmente Isadora e Vinícius pelo convívio, colaboração nos estudos, pelas risadas e momentos descontraídos.
- À minhas amigas de graduação (UESB 2007), em especial à Jacy, Mona, Ró, Lane, Val, Lu, Kari, que não estão mais na UESB, além das minhas companheiras de república Mônica, Mayane e Roberta pela convivência durante o período do mestrado. Lembrem-se que, apesar da distância, eu nunca me esquecerei de vocês, pois todas vocês fizeram parte da melhor etapa da minha vida.
- A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

VIANA, A. D. Propriedades termofísicas e comportamento reológico da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) em diferentes concentrações e temperaturas <sup>(1)</sup>.

## RESUMO

No presente trabalho, diferentes concentrações de sólidos solúveis e temperaturas foram utilizadas para estudar a reologia da polpa de cupuaçu, que podem ser úteis em inúmeros processos que abrangem a otimização de processos. O efeito dos tratamentos foi avaliado por meio de análises reológicas, termofísicas e físico-químicas. No experimento principal foi estudado o efeito da temperatura (10, 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70)°C e concentrações (14, 17, 19, 23 e 25)°Brix no comportamento reológico. Os ensaios mostraram que os dados experimentais puderam ser descritos pelo modelo de Windhab e a polpa apresentou comportamento tixotrópico. Os valores da tensão de cisalhamento inicial, ou residual ( $\tau_0$ ) variaram de zero (temperatura de 60°C, concentração de 19°Brix, na condição IDA, temperaturas de (20, 50 e 70)°C, nas concentrações de 23, 14 e 25°Brix, respectivamente, para a condição VOLTA) até os valores máximos de 65 Pa, para a condição IDA, na temperatura de 70°C, concentração de 23°Brix e de 55 Pa, para a condição VOLTA, na temperatura de 20°C, concentração de 25°Brix. A diferença nestes valores com a temperatura e com a concentração da polpa mostra, então, que a condição inicial para que a polpa comece a escoar, depende da temperatura e da concentração da polpa. Em complemento ao estudo do comportamento reológico foram estudados o efeito da temperatura (10, 20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70)°C e concentrações (14, 17, 19, 23 e 25)°Brix nas propriedades termofísicas da polpa. A atividade de água diminuiu com o aumento da concentração de 0,989/14°Brix para 0,967/25°Brix. O valor mínimo de condutividade elétrica foi de 6,38 S/m, na temperatura de 20°C e 19°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 8,50 S/m, na temperatura de 70°C e 17°Brix de sólidos solúveis totais. O valor mínimo de condutividade térmica foi de 0,47 W/(m<sup>2</sup>.K), na temperatura de 20°C e 25°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 0,70 W/(m<sup>2</sup>.K), na temperatura de 70°C e 14°Brix de sólidos solúveis totais. O valor mínimo de difusividade térmica foi de 0,132 mm<sup>2</sup>/s na temperatura de 20°C e 25°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 0,169 mm<sup>2</sup>/s, na temperatura de 70°C e 14°Brix de sólidos solúveis totais. Para o calor específico, o valor mínimo foi de 3,34 x 10<sup>3</sup> J/(kg.K), na temperatura de 40°C e 19°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 4,47 x 10<sup>3</sup> J/(kg.K) na temperatura de 70°C e 25°Brix de sólidos solúveis totais. A massa específica apresentou valor mínimo de 1,0324 kg/m<sup>3</sup> na temperatura de 60°C e sólidos solúveis totais de 14°Brix. Seu valor máximo foi de 1,1089 kg/m<sup>3</sup> na temperatura de 20°C e sólidos solúveis totais de 25°Brix. Os dados obtidos tanto para as propriedades termofísicas como para o comportamento reológico serão úteis para as Indústrias de Alimentos na otimização de processos para produção de polpas de frutas, por exemplo.

**Palavras-chave:** Reologia, termoprocessos, modelagem, propriedades físico-químicas, frutos tropicais.

---

<sup>1</sup> Orientador: Modesto Antonio Chaves, D.Sc., UESB e Co-orientador: Luciano Brito Rodrigues, D.Sc.

VIANA, A. D. Thermophysical properties and rheological behavior of the cupuassu pulp (*Theobroma grandiflorum*) in different concentrations and temperatures <sup>(1)</sup>.

### ABSTRACT

In this study, different concentrations of soluble solids and diverse temperatures were used in order to develop related questions with rheology of cupuassu pulp that can be useful in many processes. Since the preservation ranging from the long-term preservation, the possibility of concentration by evaporation under vacuum pumps of the pulp, through the sensory characteristics of the same. The effect of treatments was evaluated by rheological, thermophysical and physicochemical properties. In the main experiment was studied the effect of temperature (10, 20, 25, 30, 40, 50, 60 and 70)°C and concentrations (14, 17, 19, 23 and 25)°Brix in the rheological behavior. The tests showed that the experimental data were best explained by the model Windhab and pulp showed thixotropic behavior. The values of initial shear stress, or residual ( $\tau_0$ ) ranged from zero (temperature 60°C, concentration of 19)°Brix, in the GONE condition, temperatures of (20, 50 and 70)°C, at concentrations of (23, 14 and 25)°Brix, respectively, for the condition RETURN) until the maximum of 65 Pa, the condition for GONE, the temperature of 70°C, the concentration of 23°Brix and 55 Pa for the RETURN condition, the temperature of 20°C, the concentration of 25°Brix. The difference in these values with the temperature and the concentration of the pulp then shows that the initial condition for the squash begins to flow, depends on temperature and concentration of the pulp. In addition to modeling rheological studies on the effect of temperature (10, 20, 25, 30, 40, 50, 60 and 70)°C and concentrations (14, 17, 19, 23 and 25)°Brix on thermophysical properties of the pulp had been studied. The water activity decreased with increasing concentration of 0,989 / 14°Brix to 0,967 / 25°Brix. The minimum value of electrical conductivity was 6,38 S/m, the temperature of 20°C and 19°Brix soluble solids and the maximum value was 8,50 S/m, the temperature of 70°C and 17°Brix soluble solids. The minimum thermal conductivity was 0,47 W/m.K, temperature of 20°C and 25°Brix soluble solids and the maximum value was 0.70 W/m.K, temperature of 70°C and 14°Brix of soluble solids. The minimum value of thermal diffusivity was 0,132 mm<sup>2</sup>/s at a temperature of 20°C and 25°Brix soluble solids and the maximum value was 0,169 mm<sup>2</sup>/s at a temperature of 70°C and 14°Brix soluble solids. For the specific heat, the minimum value was 3,34x10<sup>6</sup> J/m<sup>3</sup>.K, temperature of 40°C and 19°Brix soluble solids and the maximum value was 4,47x10<sup>6</sup> J/m<sup>3</sup>.K temperature of 70°C and 25°Brix soluble solids. The density had a minimum value of 1,0324 kg/m<sup>3</sup> at 60°C and total soluble solids of 14°Brix. Your maximum was 1,1089 kg/m<sup>3</sup> at 20°C temperature and soluble solids of 25°Brix. The data for both the thermophysical properties as for the rheological behavior will be useful to the Food Industries in the optimization of processes for production of fruit pulp, for example.

**Keywords:** Rheology, thermoprocess, modelling, physicochemical properties, tropical fruits.

---

<sup>1</sup> Advisor: Modesto Antonio Chaves, D.Sc., UESB e Co-advisor: Luciano Brito Rodrigues, D.Sc.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Algumas características físico-químicas da polpa do cupuaçu.....	5
Tabela 2. Caracterização da polpa de cupuaçu.....	44
Tabela 3. Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e da estatística ( $\chi^2$ ) para os modelos ajustados correlacionando taxa e tensão de cisalhamento, para cada temperatura (TEMP) e teor de sólidos solúveis totais (SST), para as duas situações distintas: quando a tensão estava sendo aumentada (IDA) e quando da tensão estava sendo diminuída (VOLTA) .....	45
Tabela 4. Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e da estatística ( $\chi^2$ ) para os modelos ajustados correlacionando taxa e tensão de cisalhamento, para cada temperatura (TEMP) e teor de sólidos solúveis totais (SST), para as duas situações distintas: quando a tensão estava sendo aumentada (IDA) e quando da tensão estava sendo diminuída (VOLTA) .....	54
Tabela 5. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro $\tau_0$ da equação de Windhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\tau_0 = A + Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).....	57
Tabela 6. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro $\tau_1$ da equação de Winhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\tau_1 = A + Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) .....	60
Tabela 7. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro $\dot{\gamma}^*$ da equação de Windhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\dot{\gamma}^* = A + Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).....	63
Tabela 8. Valores médios, com os respectivos desvios médios, da atividade de água, em função dos SST, para a polpa de cupuaçu, na temperatura de 25°C.....	65
Tabela 9. Valores dos parâmetros e do erro do modelo polinomial cúbico ( $A_w = A + B * SST + C * SST^2 + D * SST^3$ ), correlacionando o da atividade de água da polpa de cupuaçu, a 25 °C, com os sólidos solúveis totais SST, .....	65
Tabela 10. Valores de condutividade elétrica, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e da massa específica para a polpa de cupuaçu, em função da temperatura e dos sólidos solúveis totais (SST). .....	67
Tabela 11. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a condutividade elétrica (CE) em S/m com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $CE = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	68
Tabela 12. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a condutividade térmica (K) em W/m <sup>2</sup> .K com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $K = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação ( $R^2$ ).....	71
Tabela 13. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a difusividade térmica ( $\alpha$ ) em mm <sup>2</sup> /s com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus	

Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $\alpha = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).....	73
Tabela 14. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando o calor específico (C) em MJ/m <sup>3</sup> . com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $C = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	76
Tabela 15. Valores dos parâmetros do modelo de regressão linear correlacionando a massa específica (em g/m <sup>3</sup> com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) .....	78
Tabela 16. Valores de acidez titulável e pH, para a polpa de cupuaçu, em diferentes teores de sólidos solúveis totais.....	80
Tabela 17. Coeficientes das equações de regressão linear, relacionando pH ou acidez titulável, expressa em % de ácido cítrico (AC) com os SST, expressos em graus Brix, para a polpa de cupuaçu (pH= A+B*SST ou AC=A+B*SST) .....	80
Tabela 18. Valores dos coeficientes de correção de Pearson, relacionando os parâmetros do modelo ajustado de Winhab para o comportamento reológico e as variáveis termofísicas Condutividade Elétrica, Condutividade Térmica, Difusividade Térmica, Calor Específico e Massa Específica para a polpa de Cupuaçu.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Árvore de <i>Theobroma grandiflorum</i> , e seu fruto, o cupuaçu, com detalhes da estrutura do fruto.....	4
Figura 2. Curvas de fluxo de alguns fluidos ideais .....	17
Figura 3. Reômetro Brookfield DVII+ Pro do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos - CEDETEC/UESB.....	19
Figura 4. Representação da curva para o modelo ideal de Windhab .....	28
Figura 5. O determinador de atividade de água (AQUALAB) do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos do CEDETEC/UESB.....	38
Figura 6. Spindle LV-4 utilizado na obtenção dos dados reológicos. ....	38
Figura 7. Fluxograma da Programação do reômetro .....	40
Figura 8. O KD-2 PRO do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos do CEDETEC/UESB. ....	41
Figura 9. Sistema utilizado na medição das propriedades termofísicas.....	42
Figura 10. Comportamento de $\tau_0$ , do modelo de Windhab, em função dos sólidos solúveis totais, expressos em graus Brix, para a polpa de cupuaçu para as temperaturas e 20 de 70 °C	58
Figura 11. Superfície de resposta, obtida a partir da regressão linear múltipla, relacionando temperatura e sólidos solúveis totais, com o parâmetro $\tau_0$ do modelo reológico de Windhab, ajustado para a polpa de cupuaçu. ....	59
Figura 12. Variação do parâmetro $n_a$ do modelo de Winhab com a temperatura e com os sólidos solúveis totais (SST), expressos em graus brix, para a polpa de cupuaçu. ....	62
Figura 13. Superfície de resposta, obtida a partir da regressão linear múltipla, relacionando temperatura e sólidos solúveis totais com o parâmetro $\gamma'$ do modelo reológico de Windhab, ajustado para a polpa de cupuaçu. ....	64
Figura 14. Ajuste polinomial cúbico, para a atividade de água ( $A_w$ ) em função dos sólidos solúveis totais (SST) para a polpa de cupuaçu. ....	66
Figura 15. Relações entre condutividade elétrica (CE) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu. ....	69
Figura 16. Relações entre condutividade térmica (k) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu. ....	72
Figura 17. Relações entre difusividade ( $\alpha$ ) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu. ....	75
Figura 18. Relações entre calor específico (C) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu. ....	77
Figura 19. Relações entre massa específica e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu .....	79
Figura 20. Relações entre pH e acidez titulável com os sólidos solúveis totais (SST), para a polpa de cupuaçu .....	81

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- $k$  índice de consistência (Pa.s<sup>n</sup>)
- $n$  índice de comportamento de escoamento (Pa)
- $T$  temperatura (°C ou Kelvin)
- $\tau$  tensão de cisalhamento (Pa)
- $\dot{\gamma}$  taxa de deformação (1/s)
- $\eta$  viscosidade do fluido (Pa.s)
- $\eta_{ap}$  viscosidade aparente (Pa.s)
- $\rho_f$  densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_s$  densidade das partículas (kg/m<sup>3</sup>)
- $\tau_0$  tensão de cisalhamento residual ou residual (Pa)
- $\alpha$  difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s)
- $c_p$  calor específico (J/kg.K)
- $k$  condutividade térmica (W/m.K)
- $\rho_b$  densidade hidrométrica (kg/m<sup>3</sup>)
- $\rho_{liq}$  densidade do líquido (kg/m<sup>3</sup>)
- $W_{ar}$  massa aparente da amostra (kg)
- $E$  força dinâmica (N)
- $\rho_b$  densidade geométrica (kg/m<sup>3</sup>)
- $L^3$  volume da amostra (m<sup>3</sup>)
- $W$  peso da amostra (kg)
- $\mu$  viscosidade absoluta (Pa.s)
- $K_{oc}$  tensão de cisalhamento inicial de Casson (Pa)
- $K_c \dot{\gamma}^{0,5}$  viscosidade plástica de Casson (Pa.s)
- $A_c$  Constante da tensão residual de Casson (Pa)<sup>m</sup>
- $B_c$  Constante de viscosidade de Casson (Pa.s)<sup>m</sup>
- $\tau_0^{2/3}$  Tensão de cisalhamento residual de Heinz (Pa)
- $\tau_{oH}$  Tensão de cisalhamento inicial (Pa)

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS (Continuação..... )

$n_H$  índice de comportamento de fluxo

$k_H$  índice de consistência (Pa.s)

$\tau^{0.5}$  tensão de Mizrahi-Berk (Pa)

$E$  energia de ativação (kcal)

$R$  constante universal dos gases

$R^2$  coeficiente de determinação

$\chi^2$  qui-quadrado, coeficiente estatístico

TEMP temperatura (C)

SST sólidos solúveis totais (Brix)

$aa$  atividade de água

CE condutividade elétrica (S/m)

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 - REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1 Cupuaçu.....	3
2.2 Propriedades Termofísicas .....	6
2.2.1 Calor específico.....	7
2.2.2 Condutividade térmica.....	8
2.2.3 Difusividade Térmica.....	10
2.2.4 Massa específica .....	12
2.3 Reologia.....	15
2.4 Condutividade elétrica.....	19
2.5 Modelos Reológicos.....	21
2.5.1 Modelo de Ostwald-de-Waele ( Lei da Potência ).....	21
2.5.2 Modelo de Bingham .....	22
2.5.3 Modelo de Casson.....	23
2.5.4 Modelo de Casson Generalizado.....	23
2.5.5 Modelo de Heinz-Casson.....	24
2.5.6 Modelo de Herschel-Bulkley .....	24
2.5.7 Modelo de Mizrahi-Berk .....	25
2.5.8 Schulmann-Haroske-Reher .....	26
2.5.9 Modelo de Windhab .....	26
2.6 Dependência da Viscosidade com a temperatura.....	29
2.7 Influência das pectinas .....	30
2.8 Influência dos sistemas de medida nas propriedades reológicas .....	32
2.9 Influência das partículas suspensas no comportamento reológico .....	33
3 - MATERIAL E MÉTODOS .....	36
3.1 Obtenção da polpa.....	36
3.2 Preparo das amostras.....	36
3.3 Análises físicas e químicas .....	36
3.3.1 Sólidos Solúveis.....	37
3.3.2 pH.....	37
3.3.3 Atividade de água.....	37
3.4 Medidas reológicas.....	38
3.5 Análise dos resultados para as propriedades reológicas.....	39
3.6 Análises Termofísicas .....	41
3.6.1 Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico .....	41
3.6.2 Massa específica .....	42
3.6.3 Condutividade elétrica.....	43
3.7 Análise dos resultados das propriedades físicas .....	43
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1 Polpa cupuaçu <i>in natura</i> - Caracterização.....	44
4.2 Modelos reológicos .....	44
4.2 Propriedades termofísicas.....	64
4.2.1 Atividade de água.....	64
4.2.2 Propriedades Termofísicas.....	66
4.3 Relações entre as Propriedades reológicas e termofísicas.....	81

4.3.1 Correlações entre parâmetros do modelo reológico e propriedades termofísicas.....	81
5 - CONCLUSÕES .....	85
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE A.....	99
pH – Método Potenciométrico nº 4.7.2 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).....	100
ACIDEZ TOTAL – Método acidimétrico da A.O.A.C, nº 942.15B (HELDRICH, 1990).....	101
AÇÚCARES REDUTORES – Método glicídeos redutores em glicose da A.O.A.C., nº 958.06 (ARLINGTON, 1995).....	103
CINZAS – Método A.O.A.C nº 940.26 (HELDRICH, 1990).....	105
PECTINA – Método de Carré & Haynes (PEARSON, 1976).....	106

## 1 INTRODUÇÃO

As frutas tropicais brasileiras representam um grande mercado potencial que vem crescendo em um ritmo considerável e a cada dia novos mercados são conquistados. De acordo com Schottler e Hamatschek (1994) citado por Silva *et al.* (2002), a atração por essas frutas é devido a sua aparência e o sabor exótico que detêm. Dentre esse grupo, destaca-se o cupuaçuzeiro, botanicamente classificado como *Theobroma grandiflorum* (Wild ex. Spreng.) Schum., pertencente ao mesmo gênero do cacau (*Theobroma cacao*). E assim como o cacau suas sementes também servem de matéria-prima para obtenção de chocolate, também conhecido como “cupulate”.

As questões relacionadas ao manuseio de frutas em escala industrial têm como uma das soluções mais práticas a transformação da matéria-prima em polpa, viabilizando a utilização de inúmeros processos que abrangem desde a preservação de longo prazo, por congelamento ou adição de conservantes, até a possibilidade de concentração, de elaboração de novos produtos etc. As polpas de frutas, na forma de matéria-prima destinada à industrialização, estão, como outros produtos alimentícios, sujeitas a processos de aquecimento e resfriamento (CABRAL, 2002).

Informações sobre as propriedades termofísicas, como condutividade térmica, difusividade térmica, capacidade calorífica, são importantes em sistemas industriais onde se aplicam processos de aquecimento, resfriamento e estocagem sob temperatura controlada. Nestes processos as características dos materiais entram como dados no dimensionamento de sistemas de aquecimento, resfriamento e manutenção da temperatura. Os dados característicos de cada material também permitem prever as relações tempo-temperatura necessária para atingir a temperatura desejada no processo de transferência de calor.

O comportamento reológico e propriedades de fluxo de polpas de frutas têm um papel significativo na indústria de alimentos em que regulam o desenvolvimento do produto, concepção e avaliação dos equipamentos, tais como bombas, tubulações, trocadores de calor, evaporadores, esterilizadores e misturadores (AHMED *et al.*, 2005a). Além disso, o conhecimento das propriedades reológicas fundamentais de qualquer alimento pode ser uma indicação de como o alimento se comporta sob várias condições de processo (AHMED *et al.* 2005b), como cita Branco (1995), resolver problemas como a incorporação de ar, que pode dificultar o funcionamento da bomba, e reações indesejadas como a oxidação e contaminação.

Neste caso destaca-se a importância do conhecimento das propriedades físicas, dentre estas, as termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico, massa específica) e o comportamento reológico que são importantes no estudo e otimização de processos, no que diz respeito a cálculos de cargas térmicas, dispêndios energéticos, dimensionamento de equipamentos envolvidos com as operações unitárias relacionadas com transferência de calor, massa e quantidade de movimento, além do desenvolvimento de novos produtos.

No presente trabalho foram estudadas as propriedades termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e massa específica) e o comportamento reológico da polpa de cupuaçu concentrada em cinco concentrações (14, 17, 19, 23, 25)°Brix sob sete temperaturas (20, 25, 30, 40, 50, 60, 70)°C.

### **1.1 Objetivos**

Portanto, o objetivo da realização desta pesquisa foi estudar e caracterizar a polpa do cupuaçu, o seu comportamento reológico, as propriedades termofísicas, e utilizar modelos que melhor expliquem o comportamento da polpa do cupuaçu “*in natura*” e concentrada a diferentes teores de sólidos solúveis totais (SST) sob diferentes temperaturas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cupuaçu

O Brasil é hoje o terceiro maior produtor mundial de frutas, atrás da China e da Índia - e o 15º exportador, devido a um expressivo consumo interno. O potencial de expansão para os próximos quatro ou cinco anos é de 4,5% ao ano. Do total da produção, 47% vão para o consumo na forma de frutas frescas, sendo 45 % no mercado interno e outros restantes 2% para exportações. Os outros 53% da produção são utilizados nas agroindústrias, a maior parte na forma de suco de laranja, produto pelo qual o Brasil é o maior exportador e produtor mundial (CETEV, 2008).

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) é uma fruta tropical que apresenta excelentes características de aroma, sabor e textura, tendo adquirido grande aceitação no mercado nacional e internacional, apresentando grande potencial econômico no que se diz à industrialização e comercialização (VRIESMAN *et al.*, 2009).

O cupuaçuzeiro é da família Sterculiaceae, nativo da América tropical, pertencente ao mesmo gênero do cacau (*Theobroma cacao*). Segundo Venturieri (1993) citado por Pereira (2003), esta espécie ocupa segundo lugar do gênero em relação ao potencial econômico antecedido da espécie *Theobroma cacao*, sendo considerada uma importante fonte de renda para as famílias da Amazônia.

O cupuaçuzeiro é facilmente encontrado nas regiões sul e sudeste do estado do Pará em estado silvestre, somente nas florestas tropicais úmidas da terra firme, abrangendo as áreas do Médio Tapajós, rios Xingu e Guamá, alcançando a região nordeste do Maranhão. Além de estar disseminado em toda bacia Amazônica, o cupuaçuzeiro também é encontrado em outros países como a Colômbia, Venezuela, Equador e Costa Rica. Sendo uma árvore de fácil adaptação, o cupuaçuzeiro também pode ser encontrado em estados como Espírito Santo, São Paulo, Bahia (VILALBA, 2003).

No sul da Bahia, o cupuaçu foi introduzido em 1930, na antiga Estação Experimental de Água Preta, no município de Uruçuca. Nesta região, estima-se que existam mais de 150 ha com cultivo de cupuaçu. Apesar da origem amazônica, o cupuaçuzeiro comporta-se melhor na região sul da Bahia no tocante à produtividade e época de produção, que se estende praticamente por dez meses, enquanto na região norte é de seis meses (FILHO e RAMOS, 2006).

O fruto é do tipo drupáceo (que tem bagas), de forma alongada e com as extremidades arredondadas. A casca epicarpo é rígida e lenhosa, recoberta por uma camada de pó ferrugíneo que, quando raspada, expõe a epiderme de coloração verde. A casca também é constituída do mesocarpo (camada mais interior), de cor branco-amarelada com aproximadamente sete milímetros de espessura. O comprimento dos frutos varia de 12 a 25 cm, com diâmetro de cerca de 10 cm. O peso, segundo o tipo, pode alcançar 4 kg (COHEN, 2003). A Figura 1 mostra a planta, o fruto e detalhes de sua estrutura.



**Figura 1 - Árvore de *Theobroma grandiflorum*, e seu fruto, o cupuaçu, com detalhes da estrutura do fruto. (Fonte: Reisdorff, 2007).**

O endocarpo do cupuaçu é carnoso e, segundo Venturieri (1993) citado por Silva (2002), possui alto valor nutricional e boas propriedades organolépticas, resultando daí seu grande potencial econômico. Sua polpa, que contém ainda vitamina C, é ácida e fibrosa, com coloração amarelo-clara e com um agradável e pronunciado aroma, sendo amplamente consumidos em refrescos, sorvetes, geléias, compotas, iogurtes e doces. Existem ainda muitas outras formas de utilizar a polpa do cupuaçu, como em recheios de balas e bombons, bolos e tortas, pudim, creme nevado, suco, licor e, apesar de menos preferida, *in natura* (VRIESMAN, 2008).

Para o cupuaçu, o rendimento dos frutos varia de acordo com o tamanho, a procedência, o período de safra e o método de extração (CARVALHO, 2004). Os frutos pesam em média 1,275 kg e têm cerca de 43% de casca, 38,5% de polpa, 17,19% de semente e 2,85% de placenta (FRANCO, 1999 citado por FERREIRA, 2008). Na Tabela 1 são mostradas algumas características físico-químicas da polpa do cupuaçu.

**Tabela 1. Algumas características físico-químicas da polpa do cupuaçu.**

Propriedade	Valores mínimos e máximos e seus autores				
	Matos <i>et al.</i> (2008)	Ribeiro <i>et al.</i> (2008)	Júnior <i>et al.</i> (2003)	Silva e Silva (2000)	Rocha Neto <i>et al.</i> (1999)
Sólidos Solúveis (°Brix)	13,43-13,79	12,85	10,5-10,8	8,7-11,4	-
pH	2,98-3,08	3,80	3,2-3,6	3,3-3,6	3,30
Acidez total expressa em ácido cítrico (g/100g)	2,92-3,23	2,02	1,50	1,7-2,3	2,15
Umidade (%)	83,84-84,57	-	81,3-89,0	-	89,0

Os grupos populacionais de cupuaçu são encontrados com uma enorme quantidade de variedades, deste modo (VRIESMAN, 2008), os classificam através de suas características morfológicas, como formato do fruto ou da ausência e presença de sementes, da seguinte forma:

- Cupuaçu redondo: fruto de extremidades arredondadas e peso médio de 1,5kg, com a casca em torno de 6 a 7 mm de espessura. Esta é a variedade mais comum da região Amazônica;
- Cupuaçu casca fina: semelhante ao redondo, porém com casca de 4 a 5 mm de espessura, com formato cilíndrico levemente anguloso nas laterais;
- Cupuaçu mamorana: Chegando a pesar até 4 kg, apresentando uma casca grossa que varia de 7 a 9 mm de espessura e anguloso nas laterais;
- Cupuaçu de colares: Peso levemente superior ao grupo redondo com casca que varia de 6 a 7 mm de espessura, sem angulação nas laterais, sementes médias, largo na parte próxima ao pedúnculo e estreito na posterior;
- Cupuaçu mamau: Os frutos não apresentam sementes, a casca tem uma espessura que varia de 6 a 7 mm de espessura e o formato da fruta é arredondado, bastante parecido com o cupuaçu redondo, seu peso médio é de 1,5kg.

Em termos ecológicos, o cupuaçu é uma excelente espécie frutífera para a recuperação de capoeiras e áreas devastadas, fato que ocorreu principalmente nos fluxos migratórios para a região Amazônica nas décadas de 70 e 80 (VENTURIERI, 1993 citado por VILALBA, 2003)

A colheita é feita normalmente recolhendo-se os frutos maduros que caem espontaneamente. Após a colheita pode permanecer em torno de uma semana em condições satisfatórias para o consumo ou beneficiamento. Por ser um fruto não climatérico, recomenda-se que a maturação do cupuaçu se

complete na planta, pois, uma vez colhido, o fruto geralmente não completa sua maturação e não desenvolve sabor e aroma característicos, tornando-se assim inaproveitável.

O procedimento tradicional para separação da polpa é realizado manualmente com tesouras, mas esse processo artesanal está sendo substituído por despoldadeiras mecânicas de médio e grande porte, proporcionando maior produtividade e melhoria dos padrões de qualidade do produto final, especialmente no quesito higiene. Várias empresas nacionais e internacionais já comercializam esses produtos em grandes quantidades (PEREIRA, 2003).

Em relação ao armazenamento da polpa, foi verificado que o curto espaço de tempo entre a coleta da fruta, o despoldamento, acondicionamento e congelamento é essencial para a qualidade da polpa durante a estocagem sob congelamento, também a impermeabilidade da embalagem (filmes de alta densidade) para os compostos voláteis é essencial para manter as características organolépticas da polpa, nessas condições a polpa pode ser armazenada aproximadamente por 203 dias congelada (VILALBA, 2003).

## **2.2 Propriedades Termofísicas**

No passado as análises de transferência de calor no aquecimento e resfriamento de alimentos utilizavam valores uniformes e constantes das propriedades termofísicas. Estas análises eram relativamente simples e não consideravam o comportamento variável das propriedades. Atualmente, os procedimentos analíticos, cada vez mais sofisticados, consideram a variação com o tempo, temperatura e a posição das propriedades termofísicas. Por isso o conhecimento dessas propriedades e de seu comportamento durante o processo é fator fundamental e limitante para a exatidão dos cálculos das taxas de transferência de calor (MOURA, *et al.*, 1998).

O dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos, principalmente os que abrangem a transferência de calor, exigem dados precisos das propriedades térmicas dos produtos, tais como condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e massa específica, e de como essas propriedades se comportam durante o processo, em função da temperatura. A necessidade de se conhecer as propriedades térmicas com precisão tem levado ao estudo da influência da composição e da temperatura nestas propriedades (MOURA, 2003).

As propriedades térmicas são bem definidas para materiais não biológicos, mas são escassas as informações das mesmas para alimentos. Estas propriedades são de grande importância para se determinar, entre outras, a taxa de transferência de calor e o meio dentro do próprio alimento (SINGH e HELDMAN, 1998), possibilitando a otimização do processo uma vez que o correto dimensionamento das instalações, bem como as cargas energéticas, depende da natureza termofísica do produto a ser utilizado.

### 2.2.1 Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de energia térmica que é absorvida ou perdida por unidade de massa do produto para se efetuar uma variação na temperatura, sem mudança de estado (SINGH e HELDMAN, 1998). Pode ser referenciado à pressão constante ( $c_p$ ), e a volume constante ( $c_v$ ), que são chamados de “calores específicos principais” (ALVARADO, 2001).

De um modo geral, o calor específico indica quanto calor é requerido para mudar a temperatura da unidade de massa de um material, ou seja, representa apenas o calor sensível (SILVA, 1997).

Vários métodos têm sido utilizados para medir o calor específico (RAHMAN, 1995). Os métodos de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e técnicas de misturas são comumente utilizados. As vantagens da DSC é que a medição é rápida e uma pequena amostra pode produzir resultados precisos para produtos homogêneos (WANG e KOLBE, 1991 citado por LOZANO, 2006).

O calor específico pode ser determinado, por exemplo, com a utilização de um calorímetro de mistura, construído com uma ampola de garrafa térmica comercial, com capacidade para 1000 mL, envolvida por uma camada de 0,05 m de isolante térmico constituído de lã de vidro e tendo como invólucro um cilindro de PVC de 0,15 m de diâmetro (SANTOS, *et al.* 2006).

O calor específico pode ser medido diretamente pelo método da sonda quente em regime transiente (VAN GELDER, 1998), utilizando, por exemplo, o aparelho KD2 Pro, que é um analisador automático de propriedades térmicas.

MOURA *et al.* (1998), determinaram as propriedades termofísicas experimentalmente sucos de frutas tropicais (cupuaçu, açaí e graviola) nas temperaturas na faixa de (10 a 80)°C o calor específico variou de 3,69 kJ/(kg°C) para suco de açaí, 3,89 kJ/(kg°C) para polpa de cupuaçu e 3,97 kJ/(kg°C) para polpa de graviola.

LIMA *et al.* (2003), ao estudarem as propriedades termofísicas de polpa de umbu a diferentes teores de sólidos (10, 20 e 30)°Brix, verificaram diferença significativa quanto aos calores específicos das amostras sendo que variou de - 10°Brix-3,67kJ/(kg°C); 20°Brix-3,48kJ/(kg°C); 30°Brix- 3,2148 kJ/(kg°C), ou seja, o calor específico diminuiu com o aumento da concentração de sólidos solúveis.

ARAUJO *et al.* (2004), ao determinarem o calor específico da polpa de cupuaçu sob três condições de teor de sólidos: Integral (12°Brix), 9°Brix e peneirada – e verificaram que os resultados médios experimentais obtidos para o calor específico das amostras apresentaram variações entre um mínimo de 3,18 kJ/(kg°C) do material peneirado e máximo de 3,71 kJ/(kg°C) das amostras 9°Brix. Observaram a correspondência entre os valores de calor específico e o teor de sólidos solúveis. O calor específico das amostras a 9°Brix diferiram significativamente do calor específico das amostras integrais e peneiradas, superando-as em pelo menos 14%. Já o calor específico das amostras integral e peneirada não diferem significativamente entre si.

MUNIZ *et al.* (2006), estudaram o calor específico da polpa de bacuri em diferentes concentrações de (5 a 20)°Brix, verificaram que o calor específico das amostras diminuiu com o

aumento da concentração, com o menor valor determinado para as amostras a 20°Brix, refletindo o maior valor a 5°Brix, refletindo o maior valor dessa propriedade para amostra com maior fração de água.

CABRAL *et al.* (2007), determinaram as propriedades termofísicas de suco de amora a (9,4 a 58,4) °Brix e concentrada no rotaevaporador sob vácuo, nas temperaturas de (0,5 a 80,8)°C o calor específico apresentou valor mínimo de 2,4162 kJ/(kg.°C) na concentração de 58, 4°Brix a 9,3°C e máximo de 4,3003 kJ/(kg.°C) na concentração de 9,4°Brix a 80,8°C.

MURAMATSU *et al.* (2010), mediram as propriedades termofísicas de três tipos de sucos de frutos (uva, pepino e laranja), sob temperaturas variando de (10 a 50)°C e concentrações (10 a 50)%, eles verificaram que os valores de calor específico variaram de (2.6-4.1) kJ/(kg.°C) para as amostras de suco de pepino sob as condições de medidas. Eles ainda observaram que o calor específico aumentou com o aumento da temperatura para cada concentração e para cada amostra e diminuiu com o aumento da concentração.

### 2.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica ( $k$ , com unidade no SI W/m.K) de um material é a medida de sua capacidade para conduzir calor. Nos alimentos a condutividade térmica depende principalmente da composição e também é função dos fatores que afetam a trajetória do calor ao longo do material, tais como percentual de espaços vazios, formato, tamanho e distribuição dos espaços vazios, homogeneidade e orientação das fibras, como, por exemplo, em carnes congeladas (SILVA, 1997).

Existem, atualmente, vários métodos de se medir a condutividade térmica dos materiais. Estes métodos podem ser classificados em métodos de estado estacionário e métodos de estado não estacionário. Os primeiros são mais fáceis de serem realizados, entretanto, demandam relativamente grande quantidade de tempo para que seja atingido o regime estacionário para a realização da análise (MOURA, 2003). As metodologias baseadas no estado transiente, apesar de serem mais difíceis de serem realizadas, são mais adequadas para alimentos, pois as medições são realizadas em poucos minutos, evitando, assim, alterações na amostra em consequência de sua atividade microbológica e ou química, já que estes materiais são de natureza biológica (FONTANA *et al.* 1999). Este método de medida baseia-se na aquisição de perfis de temperatura ao longo de um tempo predefinido (MOHSENIN, 1980). Além do tempo de análise requerido, ser muito menor do que no regime estacionário, o que favorece a utilização do método como de rotina, as metodologias para regimes transientes possuem também a vantagem de poderem ser utilizadas para determinar outras propriedades termofísicas, como a difusividade e capacidade térmica volumétrica (VAN GELDER, 1998). Métodos transientes podem ser utilizados em uma grande quantidade de matérias, entretanto,

eles são menos exatos que os métodos de estado estacionário, quando se trata de materiais secos (MOHSENIN, 1980).

A condutividade térmica de alimentos e sua relação com o conteúdo de água é uma das mais importantes propriedades de transporte requeridas para modelar processos em que massa e energia são trocados (PINHEIRO, 2004).

TELIS-ROMERO *et al.* (1998) determinaram a variação da condutividade térmica de suco de laranja com a temperatura na faixa de (0,5 a 62)°C e com o conteúdo de água do produto, expresso em fração mássica, expresso na faixa 0,34 a 0,73. Verificaram que há um aumento dos valores da condutividade térmica do mesmo com a elevação da temperatura e com o incremento do seu teor de umidade. AZOUBEL *et al.* (2005), determinaram a condutividade térmica do suco de caju em função do conteúdo de sólidos solúveis no produto, na faixa de (5 a 25) °Brix. Os autores observaram uma forte dependência da propriedade com o conteúdo de sólidos, mostrando a mesma tendência observada por (TELIS-ROMERO *et al.*, 1998).

SOUZA *et al.* (2000), determinaram experimentalmente as propriedades termofísicas de polpa de frutas tropicais como graviola, manga e pinha, cujas determinações foram feitas com amostras de vários níveis de concentração e temperatura e os dados de condutividade térmica foram calculados a partir das difusividades experimentais, apresentaram valores que variaram entre (0,368 e 0,441) W/(m°C), dependendo da concentração de sólidos solúveis ou do teor de umidade presente nas polpas, conforme aumentou-se a umidade os valores da condutividade térmica também aumentaram.

OLIVEIRA *et al.* (2001), determinaram a condutividade térmica ( $k$ ) do suco de laranja em diferentes concentrações (11 a 59)°Brix, os valores de  $k$  variaram de (0,2 a 0,57) W/(m.°C).

SILVA *et al.* (2002), ao estudarem a cinética de resfriamento dos frutos de cajá as temperaturas de 5, 10 e 15°C, e observaram que os valores da condutividade térmica variaram de 0,406 a 0,435 W/(m.°C), aumentando em função da diminuição da temperatura de 15 para 5°C.

LIMA *et al.* (2003), estudaram as propriedades termofísicas da polpa de umbu com teores de sólidos solúveis totais de (10, 20 e 30) °Brix, obtendo valores de 0,588, 0,550, 0,499 W/(m.°C) respectivamente, permitindo observar que os valores da condutividade térmica diminuíram com o aumento da concentração de sólidos solúveis totais.

ARAUJO *et al.* (2004), ao determinar as propriedades termofísicas da polpa de cupuaçu a diferentes teores de sólidos – integral, 9°Brix, peneirada – observaram estatisticamente que as polpas integral e peneirada não diferiram quanto aos valores obtidos para a condutividade térmica, (0,44 e 0,42) W/(m°C) respectivamente, diferenciando da polpa a 9°Brix a 0,50 W/m<sup>2</sup>°C.

BAUMER *et al.* (2006), ao investigar experimentalmente a condutividade térmica de banana relacionando com a umidade, verificaram que a condutividade se comportou de forma irregular, uma vez que a relação deveria ser que quanto menor a umidade, menor deveria ser a condutividade, a condutividade variou de (0,442744 – 0,333358) W/(m.K) para umidade de (73,35000 – 69,96157) ,

porém no decorrer do intervalo a condutividade não apresentou uma sequência de redução, os autores atribuíram esses resultados, pelo fato que houve presença de porosidade e direção das fibras.

MUNIZ *et al.* (2006), estudaram as propriedades termofísicas de polpas de Bacuri, nas temperaturas de 25 e 30°C e concentrações de (5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20)°Brix, e observaram que a condutividade térmica diminuiu com o aumento da concentração, significando que a capacidade para conduzir calor da polpa de bacuri diminuiu com a concentração, os valores variaram de 0,64 W/(m.K) e 5°Brix à 0,50 W/(m.K) e 20°Brix.

CABRAL *et al.* (2007), determinaram as propriedades termofísicas de suco de amora a (9,4 a 58,4) °Brix e concentrada no rotaevaporador sob vácuo, nas temperaturas de (0,5 a 80,8)°C a condutividade térmica apresentou um mínimo de 0,389 W/(m.°C) na concentração de 58,9°Brix e 0,5°C e máximo de 0,652 °Brix a 80,8°C.

MARIANI *et al.* (2009), ao estimarem a condutividade térmica aparente de purê de cenoura durante congelamento, observaram que a condutividade térmica diminuiu com o aumento da temperatura variando 0,6473 W/(m.K) e 20°C à 0,6153 W/(m.K) e 40°C.

MURAMATSU *et al.* (2010), mediram as propriedades termofísicas de 2 tipos de sucos de frutas (uva e laranja), sob temperaturas variando de (10 a 50)°C e concentrações (10 a 50)%, eles verificaram que os valores de condutividade térmica variaram de (0,42 a 0,62) W/(m.°C) para sucos de uva e para suco de laranja (0,46-0,61) W/(m.°C). Eles ainda observaram que a condutividade térmica aumentou linearmente com o aumento da temperatura e diminuiu com o aumento da concentração.

### 2.2.3 Difusividade Térmica

A difusividade térmica ( $\alpha$ , com unidade no SI m<sup>2</sup>/s) de um meio ou produto está relacionado à propagação de calor nele, durante as variações de temperatura com o tempo (PINHEIRO, 2004), ou seja, é a relação entre a capacidade do material de transportar calor e sua capacidade de armazená-lo.

Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto matérias de pequenos valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando em alcançar um novo estado de equilíbrio (INCROPERA e DEWITT, 2003).

Geralmente a difusividade térmica é obtida mediante relação existente entre condutividade térmica, densidade ou massa específica e calor específico. Esta relação é mostrada na equação 2:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

sendo:

$\alpha$  : difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s)

$c_p$  : calor específico J/(kg.K)

$k$  : condutividade térmica W/(m.K)

$\rho$  : densidade (kg/m<sup>3</sup>)

A difusividade térmica também pode ser medida diretamente pelo método da sonda quente em regime transiente (VAN GELDER, 1998)

A difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte que é necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente em operações básicas de processamento de alimentos, como a secagem, o processamento térmico, o resfriamento e o congelamento, porque é o parâmetro que permite estabelecer a rapidez com que o calor se difunde no alimento e conhecer o grau de dependência entre temperatura e tempo (QUEIROZ, 2001).

MOURA et al. (1998), determinaram as propriedades termofísicas de sucos de frutas tropicais (cupuaçu, açaí e graviola) nas faixas de temperaturas (10 a 80)°C a difusividade térmica apresentou um valor mínimo de  $1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  na temperatura de 50°C para um máximo de  $1,62 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a temperatura de 70°C para suco de cupuaçu. Eles perceberam que os valores de difusividade aumentaram com o aumento da temperatura e atribuíram esse comportamento a adição de ágar dissolvido no suco, conseqüentemente aumentando a convecção do sistema.

SIMÕES et al. (2000), determinaram a difusividade térmica da polpa de manga para quatro diferentes amostras (integral, centrifugada, peneirada e concentrada), e verificaram que os valores variaram de (1,41; 1,39; 1,38; 1,28)  $\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  respectivamente, percebendo-se que ao aumentar o teor de sólidos solúveis houve uma diminuição da difusividade.

AVIARA e HAQUE, (2001), estudaram a difusividade térmica de sheanut kernel e sua variação com o conteúdo de umidade, sendo que o conteúdo de umidade variou de (3,32-20,70)% com temperatura variando na faixa de (30 a 90)°C, e observaram que a difusividade térmica variou linearmente na faixa de temperatura de (74 a 76)°C.

CARBONERA et al. (2003), determinaram a difusividade térmica de uma massa comercial de massa de tomate com 18% de sólidos e obtiveram um valor médio de  $1,63 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

LIMA et al. (2003), estudaram polpas de umbu com diferentes teores de sólidos solúveis de (10, 20 e 30)° Brix e determinaram para cada amostra as propriedades termofísicas, a difusividade térmica variou de ( $1,35 \times 10^{-7}$  a  $1,52 \times 10^{-7}$ )  $\text{m}^2/\text{s}$ , diminuindo a medida que se aumentou o teor de sólidos solúveis totais, verificando diferença significativa a 5% pelo teste de Tuckey entre a difusividades das amostras.

ARAUJO et al. (2004), determinaram a difusividade térmica de polpa de cupuaçu em três condições de teores de sólidos: *in natura* (12°Brix), 9°Brix e peneirada, e a temperatura variou de (25 a 60)°C. Utilizando o teste de Tukey, não demonstrou diferença significativa entre as amostras a 5% de probabilidade. Isso significa que as diferenças entre os teores de sólidos das amostras não resultaram em influência sobre a difusividade térmica, os valores de difusividade térmica determinados experimentalmente de ( $1,27 \times 10^{-7}$  a  $1,32 \times 10^{-7}$ )  $\text{m}^2/\text{s}$  encontram-se dentro da faixa de

valores obtidos por autores como Alvarado (1994), que trabalhou com polpa de mamão e Bhowmik e Hayakawa (1979), com polpa de maçã e tomate, os quais obtiveram resultados de difusividade térmica variando de  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

AZUBEL *et al.* (2005), mediram as propriedades termofísicas da polpa de caju a  $30^\circ\text{C}$  com conteúdo de sólidos solúveis na faixa de (5,5 a  $25^\circ\text{Brix}$ ), verificaram que a difusividade térmica apresentou forte dependência da concentração, diminuindo com o aumento da concentração, os valores variaram de  $(1,44 \text{ a } 1,32) \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ., eles atribuíram essas diferenças ao conteúdo de água no suco, que com o aumento de fração de água tende ao aumento nas propriedades termofísicas, principalmente a difusividade térmica.

CABRAL *et al.* (2007), determinaram as propriedades termofísicas de suco de amora a ( $9,4 \text{ a } 58,4$ )  $^\circ\text{Brix}$  e concentrada no rotaevaporador sob vácuo, nas temperaturas de ( $0,5 \text{ a } 80,8$ ) $^\circ\text{C}$  a difusividade térmica apresentou um mínimo de  $1,308 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  na concentração de  $58,4^\circ\text{Brix}$  a  $0,5^\circ\text{C}$  e máximo de  $1,552 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a concentração de  $9,4^\circ\text{Brix}$  e  $80,8^\circ\text{C}$ .

KUROSAWA *et al.* (2008) determinaram a difusividade térmica de mamão e caju como uma função da temperatura. Para a determinação experimental, a fonte de calor sonda térmica foi utilizada. Propriedades térmicas foram medidas para a faixa de temperatura de ( $20 \text{ a } 40$ )  $^\circ\text{C}$  para o mamão e ( $25 \text{ a } 45$ ) $^\circ\text{C}$  para caju. A difusividade térmica variou de  $(1,03 \times 10^{-7} \text{ a } 1,18 \times 10^{-7}) \text{ m}^2/\text{s}$  e  $(0,98 \times 10^{-7} \text{ a } 1,16 \times 10^{-7}) \text{ m}^2/\text{s}$  para mamão e caju, respectivamente. Verificou-se que, para mamão e caju, a difusividade térmica aumenta com o aumento da temperatura.

MARIANI *et al.* (2008), ao estimar a difusividade térmica aparente de banana em diferentes temperaturas de secagem ( $17 \text{ a } 65$ ) $^\circ\text{C}$ , observaram que pequenas mudanças na temperatura e conteúdo de umidade da banana, causa uma mudança abrupta na difusividade térmica aparente, diminuindo com a diminuição da umidade.

SOUZA (2008), determinaram a difusividade térmica de frutos pequenos (framboesa, amora, mirtilo e morango), nas temperaturas de ( $25, 40, 55, 70$ ) $^\circ\text{C}$  e concentrações de açúcar de ( $0; 4,75; 9,08$ )%; e obtiveram valores mínimos de  $1,37 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  para as polpas de framboesa e morango a  $25^\circ\text{C}/9,08\%$  de açúcar e  $25^\circ\text{C}/4,75\%$  açúcar respectivamente e valor máximo de  $1,72 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  para a polpa de mirtilo a  $70^\circ\text{C}/0\%$  de açúcar.

MURAMATSU *et al.* (2010), mediram as propriedades termofísicas de dois tipos de sucos de frutas (uva e laranja), sob temperaturas variando de ( $10\text{-}50$ ) $^\circ\text{C}$  e concentrações ( $10\text{-}50$ )%, eles verificaram que os valores de difusividade térmica variaram de  $1,2 \times 10^{-7}$ - $1,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  para as duas amostras de suco. Eles ainda observaram que a difusividade térmica manteve-se constante com o aumento da temperatura e diminuiu com o aumento da concentração.

#### 2.2.4 Massa específica

Massa específica ou densidade ( $\rho$ ) é definida como massa (kg) de um material por unidade de volume ( $m^3$ ) e expressa em  $kg/m^3$  no Sistema Internacional de unidade, sendo utilizada para caracterizar sistemas fluidos e semi fluidos. Quando a massa específica de um material inclui os poros presentes no mesmo, esta propriedade é denominada de massa específica aparente  $\rho_{ap}$ .

Hoje em dia, para a simulação de processos, há a necessidade de quantificar as mudanças da massa específica do alimento durante o seu processamento. Em operações como a secagem, a defumação, o branqueamento, a fritura e o cozimento ocorrem transferências simultâneas de calor e massa. Tais fenômenos provocam variações nos volumes dos alimentos, tanto de contração, devido a perda de umidade, como de expansão devido à dilatação de gases e/ ou líquidos ou à formação de poros no material, o que faz a sua massa mudar.

A temperatura é o fator de maior influência na massa específica (Singh e Heldman, 1998) sendo que esta pode ser medida por vários aparelhos, como os picnômetros e os densímetros convencionais e digitais. Os densímetros digitais quase sempre possuem forma cilíndrica com um bulbo central terminando em haste fina e graduada, são construídos de modo que o ponto de afloramento indique, sobre a escala, a densidade do líquido no qual está imerso o aparelho. Existem vários tipos, com valores diversos, em função da sensibilidade exigida para sua aplicação. A leitura deve ser feita sempre abaixo do menisco (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985). Os principais métodos para medir a massa específica de frutas são basicamente os métodos de medição dos níveis de volume e do peso e no setor das frutas e produtos derivados são:

- Método hidrométrico: A massa específica é calculada a partir do peso aparente da amostra e a força dinâmica. Os tecidos das frutas devem ser revestidos para evitar a perda de massa por diluição ou inundação dos poros. É baseado no princípio de Arquimedes, requer que massa do sólido seja maior que a massa específica do líquido. Sendo a densidade calculada a partir da equação 3:

$$\rho_b = \rho_{liq}(W_{ar} / E) \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{liq}$  = massa específica do líquido ( $kg/m^3$ )

$W_{ar}$  = massa aparente da amostra (kg)

$E$  = força dinâmica (N)

- Método geométrico: O volume é calculado a partir das dimensões ( $L$ ) das amostras de alimentos. Não é adequado para alimentos sólidos moles e irregulares. O valor é determinado conforme equação 4:

$$\rho_b = W / L^3 \quad (4)$$

Onde:

$L^3$  = volume da amostra ( $m^3$ )

$W$  = massa da amostra (kg)

- Método picnométrico: O picnômetro é um balão calibrado que permite a pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos a uma dada temperatura, que, por sua vez, dá a massa específica. O peso é determinado pela diferença com o frasco vazio. Para definir a temperatura experimental, o picnômetro pode ser imerso em um banho a temperatura constante e preenchido com a amostra (LOZANO, 2006). A densidade pode ser obtida através da equação 5:

$$\rho_A = \rho_{H_2O} \cdot \frac{(m_A - m_V)}{(m_{H_2O} - m_V)} \quad (5)$$

Onde:  $\rho_A$  é a massa específica da amostra ( $g/cm^3$ ) a uma dada temperatura,  $\rho_{H_2O}$  é a massa específica da água ( $g/cm^3$ ) na mesma temperatura,  $m_A$  é a massa (g) do picnômetro cheio da amostra,  $m_{H_2O}$  é a massa do picnômetro (g) cheio de água e  $m_V$  é a massa do picnômetro (g) vazio.

LIMA *et al.* (2003) estudaram polpas de umbu com teores de sólidos solúveis totais de (10, 20 e 30)°Brix e temperaturas (20, 30 e 40)°C e determinaram a massa específica em cada amostra, pelo método picnométrico e verificaram que a massa específica aumentou com o aumento da concentração e diminuiu com o aumento da temperatura variando de 1052,6  $kg/m^3$  na amostra a 10°Brix à temperatura de 40°C até 1159,8  $kg/m^3$  na amostra a 30°Brix à temperatura de 20°C.

PEREIRA *et al.* (2002) determinaram a massa específica da polpa de açaí, em três concentrações (15,2; 12,5 e 9,7)% e em cinco temperaturas (10, 20, 30, 40 e 50) °C. As massas específicas foram determinadas por métodos experimentais e teóricos. Os dados experimentais foram obtidos utilizando-se o método picnométrico. Os dados teóricos foram obtidos utilizando-se equações propostas em literatura e uma equação proposta, especificamente, para polpa de açaí. Os valores de massa específica, determinados experimentalmente, variaram entre os valores mínimos e máximos de 1007,2 e 1024,9  $kg/m^3$ , respectivamente. Com os resultados encontrados na literatura constata-se que a massa específica de suco de frutas é diretamente proporcional a concentração e inversamente proporcional à temperatura.

ARAÚJO *et al.* (2002), determinaram experimentalmente a massa específica da polpa de cupuaçu em três condições de teores de sólidos - polpa integral a 12°Brix; polpa a 12°Brix com teor reduzido de sólidos insolúveis e polpa a 9°Brix e em cinco temperaturas - (10, 20, 30, 40 e 50)°C e obtiveram valores de massa específica - (1015 e 1034)  $kg/m^3$  para a polpa integral, (997 e 1040)  $kg/m^3$  para a polpa a 9°Brix e entre (1029 e 1048)  $kg/m^3$  para a polpa 12°Brix com teor reduzido de sólidos insolúveis. Permitindo perceber, que o aumento do °Brix é inversamente proporcional ao

aumento da massa específica. Comparando-se os materiais, observa-se que na polpa peneirada, os valores obtidos superaram os da polpa integral e 9°Brix, ou seja, a eliminação de parte do particulado insolúvel, através do peneiramento, resultou em aumento da massa específica, indicando que o material solúvel presente no peneirado da polpa do cupuaçu possui massa específica superior à fração insolúvel retida em peneira. Observando os valores referentes aos materiais integrais e 9°Brix, é possível constatar a influência que os sólidos solúveis exerceram sobre a massa específica, que decresceu com a diminuição do °Brix. Apesar disso, a 10°C, a massa específica da polpa 9°Brix resultou em valor maior que o da polpa integral à mesma temperatura.

ZURITZ *et al.* (2005), estudaram o efeito da temperatura (20 a 80)°C e concentração de sólidos solúveis (22,9 a 70,6)°Brix na massa específica de sucos de uvas clarificados da região da Argentina e encontraram valor mínimo de 1065 kg/m<sup>3</sup> (80°C-22,9)°Brix e máximo de 1358,4 kg/m<sup>3</sup> (20°C-70,6°Brix) e observaram que a massa específica é fortemente afetada pelos fatores estudados.

AZOUBEL *et al.* (2005), ao estudar o efeito da concentração nas propriedades físicas do suco de caju (5,5 a 25)°Brix observaram que a densidade aumentou com o aumento da concentração de sólidos solúveis.

MUNIZ *et al.* (2006), estudaram as propriedades termofísicas de polpa de bacuri nas concentrações de (5 a 20)°Brix e temperatura de (25 e 30)°C e observaram que a massa específica variou de (1000,4 a 1048,3) kg/m<sup>3</sup> e que houve o aumento da massa específica com os aumentos da concentração e sua redução com os aumentos de temperatura.

Estudos realizados por Júnior *et al.* (2007), para predição da massa específica da manga espada, variando a temperatura (10, 20, 30, 40, 50)°C encontraram valores numa faixa de (1055,73 à 1009,38) kg/m<sup>3</sup>. Percebendo-se que a massa específica diminuiu com o aumento da temperatura e que todas diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

SOUZA, (2008) ao analisar as propriedades físicas de polpas e néctares de pequenos frutos verificou a diminuição da massa específica aparente com o aumento da temperatura, o que está relacionado a expansão volumétrica sofrida pelos mesmos, uma vez que a energia fornecida ao sistema faz com que suas moléculas vibrem com velocidades maiores, ficando cada vez mais afastadas umas das outras. Além disso, o aumento do teor de sólidos, provocado pela adição de açúcar, faz com que a massa específica aparente das polpas aumente.

### **2.3 Reologia**

O termo reologia foi criado como derivação do termo grego “rheos” que significa fluir. A reologia é o estudo do escoamento e deformação dos materiais e esta definição foi aceita desde a criação da Sociedade Americana de Reologia em 1929 (EGAWA, 2007).

A reologia tem por finalidade prever a força necessária para causar uma deformação ou escoamento em um corpo ou, reciprocamente, prever a deformação ou o escoamento resultante da

aplicação de um dado sistema de forças em um corpo (CASTRO, 2007). Essas forças podem ser de compressão, tração ou cisalhamento.

De acordo com a reologia, um material pode se deformar de três maneiras: modo elástico, modo plástico e modo viscoso. No modo elástico a deformação acontece quando uma força é aplicada e desaparece de forma instantânea quando a força é retirada. Até certo limite, dependente do material e temperatura, as tensões aplicadas são aproximadamente proporcionais às deformações. No modo plástico, a deformação ocorre até um determinado valor limite quando submetidos a ações externas, sendo permanente e não desaparecendo após a retirada da força. Já no modo viscoso a deformação é proporcional à força aplicada, mas não desaparece após a mesma ser removida (STEFFE, 1992).

A reologia abrange diferentes propriedades associadas à deformação da matéria, entre as quais: extrusibilidade, compressibilidade, ductibilidade, espalhabilidade, elasticidade, fluidez e viscosidade (VRIESMANN, 2008).

A viscosidade, por exemplo, é a propriedade física de um líquido de resistir ao fluxo induzido pela tensão aplicada (cisalhamento). Ela é dependente da natureza físico-química da substância, da temperatura, da pressão, da taxa de cisalhamento e do tempo e para definir a viscosidade em função de um desses fatores os outros devem ser mantidos constantes e bem definidos (SCHRAMM, 2006 citado por CASTRO, 2007).

A equação (6) descreve matematicamente a viscosidade dos fluidos newtonianos:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (6)$$

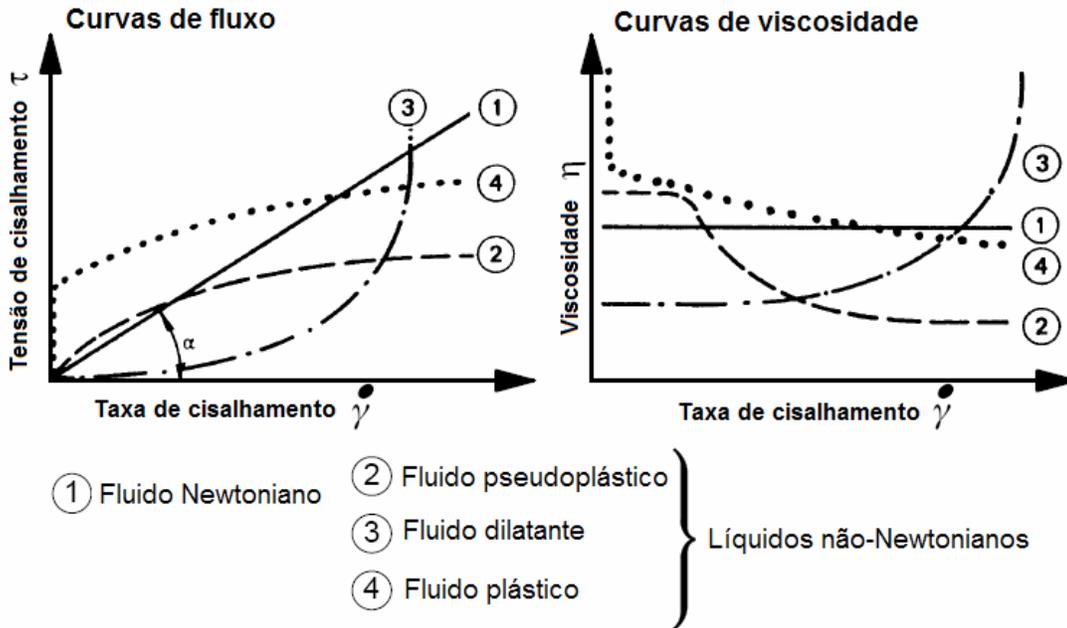
Onde:

$\mu$  = viscosidade absoluta (Pa.s)

$\tau$  = tensão de cisalhamento (Pa)

$\gamma$  = taxa de cisalhamento ( $s^{-1}$ )

O corpo viscoso mais simples é o fluido Newtoniano, para o qual a viscosidade é constante. Já para os fluidos não-newtonianos a viscosidade pode variar em muitas magnitudes com a mudança da taxa de cisalhamento ou a tensão de cisalhamento para as diversas formas de fluidos (CASTRO, 2007). Para fluidos não-newtonianos o termo viscosidade ( $\mu$ ) é substituído por viscosidade aparente ( $\mu_{ap}$ ). Estes comportamentos podem ser melhores entendidos observando-se a Figura 2.



**Figura 2 – Curvas de fluxo de alguns fluidos ideais - Adaptado de: Schramm (2006) citado por Vriesmann (2008).**

Para os fluidos Newtonianos (Figura 2 - 1) a relação existente entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento resulta numa constante. O mesmo não se pode afirmar para os fluidos não-Newtonianos. No fenômeno caracterizado pela curva referente ao fluido pseudoplástico, a viscosidade aparente diminui com a taxa de deformação e  $0 < n < 1$  ( $n$  = índice de comportamento). Muitas substâncias, como emulsões, suspensões ou dispersões de alta importância técnica e comercial pertencem a este grupo (HAMINIUK, 2005). Por outro lado, no fenômeno caracterizado pela dilatância onde  $n > 1$ , a viscosidade aumenta com a taxa de deformação. Alguns tipos de mel e suspensões de amido se enquadram nessa categoria (STEFFE, 1992).

Os materiais não-newtonianos podem ser classificados em dois grupos, segundo Egawa (2007):

- Independentes do tempo: dentro dessa classificação se enquadram os dilatantes, pseudoplásticos, plásticos e plásticos de Bingham. Segundo McClements (2007), o fluido de Bingham se comporta como um sólido sob condições estáticas. Certa quantidade de força deve ser aplicada antes que o fluxo seja induzido (tensão inicial). Alguns exemplos de fluidos alimentícios que representam esse comportamento são: molhos de tomate, maionese, clara de ovo batida e margarina (HAMINIUK, 2005). A maioria dos alimentos se enquadra nessa classificação.

- Dependentes do tempo: neste há duas categorias a serem vistas, tixotrópicos e reopéxicos. A tixotropia pode ser verificada quando o valor da viscosidade diminui com o aumento da concentração. Já para a reopexia pode ser verificada quando a viscosidade do material aumenta com o tempo a uma tensão de cisalhamento constante.

A tixotropia pode ser explicada como uma consequência da agregação das partículas em suspensão. Nestes sistemas, a interação entre partículas é um resultado da atração, decorrente da ação

de forças de van der Waals, assim como de repulsão devido a efeitos eletrostáticos e estéricos. A estabilidade do sistema depende então da existência de uma barreira de energia potencial que impede as partículas de se aproximarem umas das outras. Assim, barreiras físicas relativamente fracas levam à formação de agregados. Quando a suspensão permanece em repouso, a agregação das partículas pode formar uma rede, de modo que a suspensão passa a desenvolver uma estrutura interna. Com o cisalhamento, as barreiras mais fracas entre as partículas são rompidas, ocorrendo o rompimento da rede (FERGUSON e KEMBLOWSKI, 1991). Assim, com o aumento no tamanho das partículas, a estrutura interna deve se fortalecer, de modo a ser mais resistente ao cisalhamento (levando um maior tempo para se romper), mostrando uma tixotropia mais acentuada. Para partículas excessivamente grandes, a estrutura interna que causaria a estabilização da estrutura passa a ser insuficiente, levando à conseqüente redução da tixotropia do sistema, ou até mesmo a sedimentação das partículas grandes.

Num estudo realizado por CABRAL *et al.* (2002) com polpa de cupuaçu peneirada esta apresentou um comportamento não-newtoniano e caráter pseudoplástico. Como podemos observar anteriormente, os fluidos com caráter pseudoplástico, apresentam uma diminuição da tensão de cisalhamento com o aumento da taxa de cisalhamento, que depende principalmente da orientação/alinhamento das moléculas ou partículas na direção do fluxo (VRIESMANN, 2008).

A reologia tem desempenhado papel fundamental no desenvolvimento, fabricação e processamento de produtos alimentícios, permitindo que haja uma completa caracterização do material e otimização de processos com redução de custos e melhoria na eficiência.

A viscosidade do fluido não é uma propriedade que pode ser medida diretamente, portanto a força, o torque e a rotação a que o fluido está submetido é que fornecem o valor da viscosidade e essa pode ser aferida através de equipamentos conhecidos como viscosímetros ou reômetros, os quais podem apresentar diferentes configurações, sendo que os mais comuns são os de sistemas capilares e os de sistemas rotacionais (VRIESMAN, 2008).

Nos sistemas capilares, segundo Steefe (1992) estabelece-se uma diferença de pressão para criar o fluxo e são encontrados em duas categorias básicas: os capilares de vidro e os capilares de alta pressão. Já os sistemas rotacionais são encontrados nas formas de cilindro concêntrico, de cone e placa, de placa paralela. Os sistemas rotacionais são os mais utilizados nas medições reológicas de um material.

A Figura 3 mostra o Viscosímetro DVII+ Pro, que mede viscosidade pela técnica de cilindros concêntricos. Trata-se de aparelho digital programável com leitura direta de viscosidade em cP ou mPa.s e de porcentagem de torque, taxa e tensão de cisalhamento. Possui controle opcional através de software – Wingather ou Rheocalc.

Os dados reológicos nas indústrias de alimentos são importantes para: determinar a funcionalidade de ingredientes no desenvolvimento de produtos, controle de qualidade do produto final ou intermediário, determinação da vida de prateleira, avaliação da textura pela correlação com dados sensoriais, cálculo de engenharias de processos englobando uma grande quantidade de

equipamentos, tais como: agitadores, extrusoras, bombas, trocadores de calor, tubulações ou homogeneizadores (LANNES *et al.*, 2002).



**Figura 3 - Reômetro Brookfield DVII+ Pro do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos – CEDETEC/UESB.**

A viscosidade tem sido usada há vários anos pela indústria de chocolates, por exemplo, para descrever o aspecto de qualidade de seu produto. Também é utilizada para dimensionar tubulações e bombas que são utilizadas no transporte de chocolate fundido na planta de fabricação. Em aspectos práticos, o chocolate precisa fluir de acordo com sua utilização. Por exemplo, chocolate utilizado como cobertura de bombons precisa fluir mais que aquele utilizado para produção de tabletes (LANNES *et al.* 2002 ).

#### **2.4 Condutividade elétrica**

Vale ressaltar a importância da condutividade elétrica, que é uma propriedade física que influencia na utilização da polpa de frutas nos processos térmicos.

O efeito de temperatura em propriedades dielétricas em alimentos pode ser positivo ou negativo dependendo da temperatura, faixa de frequência, estado da constante dielétrica e o fator de perda, que são observados com o congelamento e o descongelamento dos alimentos (NELSON 1978 citado por DINIZ *et al.* 2003).

A condutividade elétrica é o fator mais importante no aquecimento ôhmico, é determinante para a viabilidade do aquecimento elétrico de um alimento (VIEIRA, 2006).

Segundo Lewis (1993), o desenvolvimento da acidez, durante muitos processos de fermentação, se deve à elevação do valor da condutividade elétrica e que as medições dessa propriedade, também, são utilizadas para medir a concentração de xarope açucarado, durante o processo de concentração que precede a cristalização.

A condutividade elétrica, segundo Diniz *et al.* (2003), pode ser utilizada como uma boa ferramenta para caracterização de produtos alimentícios, permite registrar índices de qualidade da polpa, separar lotes de polpa em diferentes níveis de qualidade, é rápido, objetivo, simples e econômico. Podendo ser conduzida por dois sistemas: de massa e individual (SOUZA, 2007).

Segundo Diniz *et al.* (2003), de forma geral, tem-se dado pouca atenção às determinações da resistência e da condutividade elétrica em frutas e em outros vegetais. Ainda segundo estes autores, na maior parte dos casos, os trabalhos dos pesquisadores são direcionados ao estabelecimento de relações, entre as propriedades elétricas e alguns fatores que determinam a qualidade dos produtos (LEWIS, 1993).

A condutividade elétrica, nos últimos anos vem se tornando uma fonte de estudo no delineamento de um novo processo de tratamento térmico: o aquecimento ôhmico, processo no qual o calor é gerado internamente pela passagem de uma corrente elétrica pelo produto. Neste processo, ao contrário dos processos convencionais onde a condutividade térmica do alimento é o parâmetro de controle, a condutividade elétrica é usada para o controle do processo. Este processo pode ser utilizado para pasteurização de sucos de frutas (PALANIAPPAN e SASTRY, 1991).

A condutividade elétrica está sendo estudada por alguns autores como DINIZ *et al.* (2003) com polpas concentradas de acerola, em concentrações que variaram de (8 a 22)°Brix e temperaturas de (25, 30, 35, 40, 50 e 60)°C Os resultados obtidos demonstraram aumentos de condutividade elétrica com o aumento de concentração. Por influência de aumentos de temperatura, não foi possível determinar uma tendência de aumento ou diminuição da condutividade elétrica. Os valores de condutividade elétrica variaram entre (0,8312 e 6,2700) mS e o aumento da concentração provocou aumentos de condutividade elétrica nas polpas. O estudo das amostras na faixa de temperatura de (25 a 60)°C não resultou em variações de condutividade elétrica que pudessem ser atribuídas às condições térmicas.

CASTRO *et al.* (2002), ao estudar a influência do conteúdo de sólidos solúveis em produtos de morango, verificou que a condutividade elétrica aumentou com o aumento da temperatura para todos os produtos e e condições testadas seguindo relações lineares e quadráticas. E diminuiu com o aumento do teor de sólidos solúveis, devido ao aumento da resistência para movimentação iônica.

SARANG *et al.* (2008), avaliou a condutividade elétrica de seis diferentes tipos de frutas (maçã vermelha, maçã dourada, pêra, ervilha, pepino e morando) sob diferentes temperatura desde a ambiente até temperatura de esterilização até 140°C. Em todos os casos a condutividade aumentou

linearmente com a temperatura. E entre as temperaturas de (25 a 80)°C a condutividade elétrica variou 0,037 S/m – 25°C até máximo de 0,801 S/m a 80°C.

MOURA (1998), ao estudar a condutividade elétrica de sucos concentrados de frutas tropicais (tangerina, abacaxi e limão), verificou para os três sucos que a condutividade elétrica aumentou com a concentração de sólidos solúveis até 30°Brix e após este valor diminuiu com o aumento do °Brix. A razão pode estar relacionada ao aumento da viscosidade dos sucos, dificultando assim a mobilidade dos íons que regem a condutividade elétrica e a esta aumenta com o aumento da temperatura e o seu efeito é mais pronunciado a maiores concentrações. Quando a condutividade aumenta mais fácil fica o aquecimento, pois a taxa de transferência de calor é proporcional a condutividade elétrica.

## 2.5 Modelos Reológicos

A modelagem provê meios para representar uma larga quantidade de dados reológicos em termos de uma simples expressão matemática. Muitas formas de equações são possíveis, no entanto, um modelo geral que se aplique a todas as situações não existe.

Existem diversas equações que descrevem o comportamento não-newtoniano do material, entre as quais algumas das mais utilizadas são: a Lei da Potência (Ostwald de Waelle), Casson, Herschel Bulkley e Mizrahi-Berk apresentadas nas equações abaixo:

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

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (7)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)

$k$  = Índice de consistência (Pa.s<sup>n</sup>)

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

Se na equação (7) o índice de comportamento reológico n for > 1 o fluido é considerado dilatante, o qual corresponde ao fenômeno inverso da pseudoplasticidade, pois a viscosidade do fluido aumenta à medida que aumenta a taxa de cisalhamento. Se n for <1 o fluido é considerado pseudoplástico.

Num estudo realizado por BRANCO e GASPARETO (2003), estes ajustaram os dados experimentais de misturas de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura a este modelo. Verificou-se

que os parâmetros índice de consistência e índice de comportamento do fluido, nas temperaturas de (10 e 60) °C foram melhores ajustados com os modelos lineares e quadráticos, respectivamente. Eles verificaram que a viscosidade é influenciada pelo conteúdo de sólidos insolúveis, fibras e pectina, pois a viscosidade da polpa foi maior que a do suco e esta maior que a do néctar. O parâmetro  $k$  do modelo de Ostwald- De Waele, aumentou com o aumento de temperatura, porém a forma desse aumento é consequência da escolha do modelo. O índice de consistência ( $n$ ) e, principalmente, a viscosidade aparente aumentou com o aumento da concentração da polpa de manga mostrando que estes parâmetros são diretamente influenciados pela composição química da polpa.

SÁ e LUIZ (2008), também avaliaram os parâmetros reológicos utilizando este modelo, e verificaram que, os valores de índice de comportamento de fluxo ( $n$ ) variaram de 0,18 a 0,56 ( $n < 1$ ), destacando o comportamento pseudoplástico dos queijos cremosos. O decréscimo na viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação significa que a resistência das amostras ao escoamento e a energia requerida para mantê-los a uma alta taxa de deformação, é reduzida.

KOOCHEKI, *et al.* (2009) aplicaram o modelo de Ostwald-de-Waele com sucesso quando comparado com o de Herschel-Buckley, ao estudar as propriedades reológicas de ketchup em função de diferentes hidrocolóides e temperaturas, apresentando todas as formulações comportamento pseudoplástico, em relação às variáveis estudadas. E a adição de hidrocolóides aumentou a viscosidade aparente e tensão residual.

### 2.5.2 Modelo de Bingham

O modelo de Bingham foi o primeiro a ser utilizado nas equações que descrevem o comportamento reológico do chocolate.

Segundo CHEVALLEY (1974), o comportamento reológico do chocolate pode ser caracterizado pela viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento residual:

$$\tau = \tau_0 + \eta_a \dot{\gamma} \quad (8)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$  = Tensão residual de Bingham (Pa)

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

$\eta_a$  = Viscosidade plástica da Bingham (Pa..s)

GUTIÉRREZ, *et al.* (2000) discutiram as possíveis diferenças entre os parâmetros reológicos obtidos mediante distintas medidas reológicas, a fim de distinguir um comportamento plástico de um pseudoplástico de suspensões cerâmicas e perceberam que ao ajustar os modelos reológicos aos dados experimentais, obtiveram resultados negativos para tensão residual para o modelo de Bingham, e juntamente com o de Casson estes obtiveram os melhores coeficientes de determinação.

### 2.5.3 Modelo de Casson

$$\tau^{0,5} = k_{oc} + k_c \dot{\gamma}^{0,5} \quad (9)$$

Onde:

$k_{oc} = \tau_{oc}$  = Tensão de cisalhamento inicial de Casson (Pa)

$k_c \dot{\gamma}^{0,5}$  = Viscosidade plástica de Casson (Pa.s)

Chocolate é um exemplo notável deste tipo de fluido, Lannes *et al.* (2002), utilizaram o modelo de Casson para descrever os dados reológicos do produto líquido de chocolate de cupuaçu.

### 2.5.4 Modelo de Casson Generalizado

Os modelos de Bingham e Casson não são absolutamente lineares, especialmente em baixas taxas de deformação. Por esta razão, CHEVALLEY (1991) sugeriu que uma forma generalizada da equação de Casson - já utilizadas por HEINZ (1959), HEEMANN e FINCKE (1962), SAUNDERS (1968) e STEINNER (1972) - contendo uma potência intermediária (m), conforme equação 10:

$$\tau^m = A_c + B_c \dot{\gamma}^m \quad (10)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$A_c$  = Constante da tensão residual de Casson (Pa)<sup>m</sup>

$B_c$  = Constante de viscosidade de Casson (Pa.s)<sup>m</sup>

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)

Neste caso, a tensão residual e a viscosidade aparente são dadas pelas relações  $A_c^{1/m}$  e  $B_c^{1/m}$ , respectivamente.

A forma generalizada de Casson pode ser utilizada variando  $m$  de 0,5 a 1,0, tornando-se a equação de Bingham se  $m = 1,0$  e equação de Casson se  $m = 0,5$ .

De acordo com SAUNDERS (1968), o índice de escoamento ( $m$ ) pode variar com a composição e a temperatura do chocolate, sendo a terceira característica que descreve o comportamento.

### 2.5.5 Modelo de Heinz-Casson

Este modelo é, historicamente, anterior ao modelo de Casson generalizado e contribuiu para sua generalização (GOZZO, 2003). O modelo é dado pela equação 11:

$$\tau = \left[ \tau_0^{2/3} + (\eta \dot{\gamma})^{2/3} \right]^{3/2} \quad (11)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$  = Tensão de cisalhamento residual de Heinz (Pa)

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

$\eta$  = Viscosidade plástica de Heinz (Pa.s)

De acordo com FIGURA e TEIXEIRA (2007) o modelo de Casson generalizado, apresenta uma forte dependência do índice de comportamento do fluido  $n$  em relação aos outros modelos como Bingham, Casson ou Heinz, embora estes modelos (Bingham, Casson e Heinz) possam ser vistos como casos especiais do modelo de Casson generalizado, da mesma forma que o modelo de Ostwald-De-Waele é um caso especial do modelo de Herschel-Bulkley.

### 2.5.6 Modelo de Herschel-Bulkley

$$\tau - \tau_{oH} = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (12)$$

Onde:

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

$K_H$  = Índice de consistência (Pa.sn)

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

Segundo, Sato e Cunha (2007) este modelo foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da polpa de jabuticaba, em relação aos modelos Newtonianos, Plásticos de Bingham e Lei da Potência, no qual se observou a redução do índice de consistência ( $k$ ) e um leve aumento do índice de comportamento de escoamento ( $n$ ) com o aumento da temperatura. Este modelo também descreveu adequadamente o comportamento de fluxo de misturas ternárias e géis pécticos de polpas de frutas vermelhas (morango, amora e framboesa), as formulações analisadas exibiram comportamento pseudoplástico e a resposta reológica foi influenciada pelas diferentes proporções de polpa por diferentes temperaturas (HAMINIUK *et al.* 2007).

CABRAL *et al.* (2002), também avaliaram o comportamento reológico da polpa de cupuaçu peneirada, e ajustaram os dados experimentais para os modelos de Ostwald de Waelle, Casson e Herschel-Bulkley, e verificaram que o modelo que apresentou os melhores coeficientes de determinação fora o de Herschel-Bulkley. As amostras apresentaram comportamento não-newtoniano e caráter pseudoplástico. Os valores do índice de consistência ( $k_n$ ), segundo o melhor ajuste, variaram entre  $7,8 \times 10^3$  (Pa.s<sub>n</sub>) e  $37,7 \times 10^3$  (Pa.s<sub>n</sub>), decrescendo com o aumento da temperatura, enquanto os valores do índice de comportamento de fluxo ( $n_n$ ) variaram entre  $0,29 \times 10^{-3}$  e  $1,16 \times 10^{-3}$  e aumentaram com o aumento da temperatura.

### 2.5.7 Modelo de Mizrahi-Berk

$$\tau^{0,5} = k_{oc} + k_c \dot{\gamma}^n \quad (13)$$

Onde:

$k_{oc}$  = Tensão de cisalhamento inicial (Pa)

$k_c \dot{\gamma}^n$  = Índice de consistência (Pa.s<sup>n</sup>)

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

Vidal *et al.* (2004) ao estudarem o efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga verificaram que os modelos que melhor descreveram este comportamento foram o de Mizhari-Berk e Lei da potência.

Silva *et al.* (2004) determinaram o comportamento reológico do suco industrializado de acerola em concentrações de sólidos solúveis de (4, 7, 10, 13 e 16)°Brix e no intervalo de temperatura de 5°C a 85°C. Os dados experimentais dos reogramas foram ajustados aos modelos reológicos de Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk e Casson. O modelo de Herschel-Bulkley descreveu adequadamente o comportamento reológico do suco industrializado de acerola. Os baixos valores obtidos para o índice de comportamento confirmaram o comportamento pseudoplástico do suco.

QUEIROZ *et al.* (1999) estudaram a influência das diferentes frações de sólidos insolúveis suspensos presentes no suco de manga (*Mangifera indica*) sobre o comportamento reológico destes sucos. O ajuste das curvas de tensão versus taxa de deformação foi feito utilizando o modelo de Mizrahi-Berk, pela aplicação dos coeficientes obtém-se que todas as frações de suco de manga, inclusive a fração centrifugada, apresentaram comportamento pseudoplástico.

FERREIRA *et al.* (2002) determinaram o comportamento reológico de polpa de caju e manga, nas temperaturas de (10, 20, 30, 40, 50, 60)°C, os dados experimentais foram melhores ajustados ajustados ao de Mizrahi-Berk.

#### 2.5.8 Schulmann-Haroske-Reher

O modelo de Schulmann-Haroske-Reher é uma função da potência, de forma semelhante ao de Ostwald-De-Waele, mas com quatro parâmetros, ao invés de dois (FIGURA E TEIXEIRA, 2007). Este modelo é dado por:

$$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (k\dot{\gamma})^{1/m} \quad (14)$$

Sendo:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$  = Tensão de cisalhamento residual (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)

$k$  = Coeficiente de consistência (Pa.s)

$m, n$  = constantes.

#### 2.5.9 Modelo de Windhab

O estudo do comportamento reológico do chocolate foi objeto de amplas pesquisas e vários autores estudaram diferentes modelos, sendo o modelo de Casson o mais utilizado desde 1973. Porém, pesquisas indicam que este modelo apresenta alterações quando resultados de diferentes laboratórios foram comparados. Chevalley (1991) e Fbanke (1998) mostraram que o modelo foi insatisfatório para diversos tipos de chocolate e inapropriado para taxas de deformação inferior a 10s<sup>-1</sup>.

Em 1991, o IOCCC (International Office for Cocoa, Chocolate and Sugar Confectionary) criou um grupo de trabalho com a finalidade de desenvolver um método que fornecesse um bom acordo entre os laboratórios, utilizando viscosímetros passíveis de serem operados nas indústrias. Entre 1991 e 1997, foram realizados 5 ciclos de testes, analisando fluidos de calibração, massa de cacau, chocolates e coberturas, envolvendo 32 laboratórios de 8 diferentes países.

O estudo conclui que para se obter bons acordos interlaboratoriais é preferível reportar os resultados em um gráfico contendo a tensão de cisalhamento em várias taxas de deformação do que utilizar o modelo de Casson (BECKETT *et al.*, 2000). O modelo de Windhab pode ser empregado quando as medidas são realizadas dentro de um único centro de pesquisa, já que a repetibilidade das medidas são mais precisas do que a reprodutibilidade entre vários laboratórios (BECKETT, 2001).

O novo acordo do IOCCC (International Office for Cocoa, Chocolate and Sugar Confectionery) (2000) substitui o método antigo (1973) e revela que inúmeros modelos podem ser utilizados, desde que, tornando-se os devidos cuidados. Porém, dentre os diversos métodos disponíveis, o modelo de Windhab é o mais recomendado porque, ao contrário dos outros, o ajuste de seus parâmetros tem um significado físico (sedimentação, escoamento etc.) e suas medidas podem ser feitas dentro dos limites da taxa de deformação da maioria dos viscosímetros disponíveis no mercado (0 a 600 s<sup>-1</sup>).

Segundo Teixeira (2007) este modelo assume que, quando o chocolate líquido é submetido a um cisalhamento, acontece uma mudança na estrutura do chocolate fundido. Isto pode ser observado por uma variação (decréscimo) no valor inicial da viscosidade (estrutura sem cisalhamento) para um valor em estado estacionário. Aqui, as forças ordenadoras (construtoras de estrutura) e as forças desordenadoras (quebradoras de estrutura) estão em equilíbrio e o chocolate mostra uma viscosidade de equilíbrio. À medida que a tensão de cisalhamento aumenta, uma viscosidade final de equilíbrio é atingida  $\eta_{\infty}$ . Na região desta viscosidade final, a curva tensão X deformação é uma reta. Esta reta pode ser extrapolada, de volta, ao ponto de taxa zero de cisalhamento, para se obter seu intercepto. Este intercepto irá fornecer uma estimativa para o parâmetro  $\tau_1$  que é uma tensão de cisalhamento hipotética (veja Figura 4).

O modelo de Windhab é dado por:

$$\tau = \tau_0 + \eta_a \dot{\gamma} + (\tau_1 - \tau_0) \left\{ 1 - e^{-\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}^*}} \right\} \quad (15)$$

Onde:

$\tau$  = Tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$  = Taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)

$\tau_0$  = Tensão de cisalhamento inicial (Pa)

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

$\tau_1$  = Tensão de cisalhamento onde a estrutura está definida (Pa)

$\dot{\gamma}^*$  = Taxa de deformação a 63,2% daquela em que a estrutura está definida (s<sup>-1</sup>)

Os parâmetros  $\tau_1$ ,  $\dot{\gamma}^*$  e  $\tau_0$  são dados pelas equações seguintes:

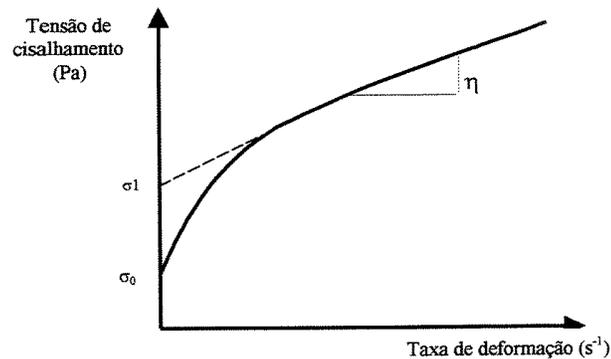
$$\tau_1 = \tau_n - (\tau_n - \tau_{n-1}) / (\dot{\gamma}_n - \dot{\gamma}_{n-1}) \dot{\gamma}_n \quad (16)$$

$$\dot{\gamma}^* = 2\dot{\gamma}\tau^* \quad (17)$$

$$\tau^* = \tau_0 + (\tau_1 - \tau_0)(1 - (1/e)) \quad (18)$$

O parâmetro  $\tau_1$ , como dito, pode ser obtido por extrapolação da curva de viscosidade a altas taxas de deformação. De forma a encontrar o ponto da curva em que se atinge  $\eta_\infty$ , o modelo de Windhab usa um segundo parâmetro  $\tau^* = \tau(\dot{\gamma}^*)$  que indica que a quebra de estrutura induzida pela taxa de deformação atinge um máximo quando uma taxa  $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}^*$  é atingida. Para taxas de deformação superiores a  $\dot{\gamma}^*$ , o material se comporta como um fluido plástico para o qual se poderia aplicar a equação de Bingham. Uma comparação entre os modelos de Windhab e o de Bingham, nos leva a concluir, neste caso, que o ponto da curva  $(\tau^*, \dot{\gamma}^*)$  é, matematicamente, o ponto em que  $\tau_1 - \tau_0$  atinge  $1 - (1/e) = 63,2\%$

O fluido ideal pelo modelo de Windhab é mostrado na Figura 4.



**Figura 4 – Representação da curva para o modelo ideal de Windhab**

Os parâmetros medidos, neste modelo, consideram reações intrínsecas que ocorrem no produto, sendo necessário um grande cuidado na realização das análises para se obter bons resultados, principalmente na preparação das amostras, calibração dos instrumentos, limpeza das geometrias, dimensões do "gap" e tempo de medida.

Segundo Gozzo (2003), o modelo de Windhab foi desenvolvido pelo professor Erick Josef Windhab. Engenheiro químico e Ph-D. em engenharia mecânica que participou da criação do Instituto Alemão de Tecnologia de Alimentos (DIL) em 1985. Participou do grupo de pesquisa do IÖCCC

(2000), sendo o departamento de ETH-Zurique um dos 32 laboratórios a participar do estudo sobre viscosidade do chocolate, publicado por BECKETT (2000).

## 2.6 Dependência da Viscosidade com a temperatura

Um dos fatores que mais afeta o comportamento reológico de um material é a temperatura, devendo ser mantida constante durante todas as medições, especialmente de materiais gordurosos como o cacau (ESCRIVÃ, 1997). Segundo Heïss (1957), a viscosidade dos líquidos decresce conforme se aumenta a temperatura, já a tensão residual não possui grande dependência.

Chocolates ao leite podem ter sua viscosidade aumentada com o aumento da temperatura. Stanley (1941) concluiu que este efeito começa a ocorrer a 40 °C para o chocolate ao leite sem lecitina e aos 60 °C para os produtos com lecitina. Observações similares foram encontradas por Steinner (1972), sugerindo que este aumento também ocorre na tensão residual.

Para o coeficiente de consistência e a viscosidade aparente, para uma taxa de cisalhamento constante, a dependência com a temperatura pode ser obtida pela relação Arrhenius:

$$k = A_k \exp(E_k / RT) \quad (19)$$

$$\eta = A_\eta \exp(E_\eta / RT) \quad (20)$$

Onde:

$k$  é o coeficiente de consistência (Pa.s)

$\eta$  é a viscosidade aparente (Pa.s)

$A_k, A_\eta$  são constantes (Pa.s)

$E$  é a energia de ativação (kmol/gmol)

$R$  é a constante universal dos gases (0,001987 kcal/gmol.K)

$T$  é a temperatura absoluta (K)

AHMED e RAMASWAMY (2003) obtiveram bons resultados com o ajuste do modelo de Arrhenius para o glicomacropéptídeo, processado a altas pressões com temperaturas entre (20 e 80)°C. Embora tenham encontrado um comportamento não consoante com o modelo, para a temperatura de 80°C. Os autores argumentaram que mudanças nas características químicas do produto nesta temperatura, foram a causa da mudança de comportamento.

A temperatura é um dos fatores que mais afeta a viscosidade das polpas de frutas, já que a maioria destas se apresenta na forma de sólidos dispersos em meios líquidos. Um aumento de temperatura, neste caso, faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando o movimento das partículas em suspensão, diminuindo, conseqüentemente, a viscosidade da polpa.

GINER *et al.* (1996), ao analisar a influência da temperatura e concentração na reologia do suco clarificado de cereja também notaram que um aumento na temperatura resultou no decréscimo da sua viscosidade; efeitos opostos na viscosidade do mesmo suco foram notados conforme o teor de sólidos solúveis aumentou.

IBARZ *et al.* (1987) analisaram o comportamento reológico dos sucos de maçã e pêra, com teor de sólidos solúveis ao redor de 70° Brix e a diferentes temperaturas, na faixa de (5 a 60)°C, observando um comportamento newtoniano para todos os casos, além de um considerável decréscimo na viscosidade à temperaturas mais elevadas. Efeito similar foi observado pelo mesmo autor, quando foi analisado o comportamento reológico do suco clarificado de pêssego, na mesma faixa de temperatura.

SAENZ e COSTELL (1986) obtiveram, em relação a produtos extraídos de limão clarificados e não clarificados, que quanto maior for à temperatura menor será a viscosidade, menor será a consistência e menor a tensão de escoamento para suco de limão clarificado e não clarificado, sendo que a variação da viscosidade com a temperatura é do tipo exponencial. O efeito da temperatura sobre o suco clarificado foi maior do que sobre o suco não clarificado, parecendo indicar que a presença de polpa e pectinas diminui a influência da temperatura no comportamento reológico destes produtos.

VITAU e RAO (1984) também trabalharam com a interação temperatura- constituintes de sucos e concluíram que a viscosidade aparente e o índice de consistência são mais sensíveis ao conteúdo de polpa para temperaturas mais altas. Ao contrário, os coeficientes que representam os valores limite para a viscosidade aparente e para o índice de consistência no caso de conteúdo de polpa zero isto é, soros decresceu com o incremento da temperatura.

VARSHNEY e KUMBHAR (1978) estudaram o escoamento de sucos de abacaxi e laranja e observaram que as curvas de escoamento do suco original de abacaxi a 7°Brix mostraram padrões newtonianos a 30°C e apresentaram algum desvio a 45°C, acusando pequena dilatância. A pseudoplasticidade aumentou com o aumento da concentração. Mantendo a concentração do suco de abacaxi, com o aumento da temperatura obtiveram um decréscimo no índice de comportamento (n) exceto para 7°Brix. Também observaram um decréscimo no fator de consistência. Foi observado um comportamento newtoniano apenas a 13°Brix e 45°C. Em todas as demais concentrações e temperaturas observaram um comportamento pseudoplástico. Afirmam ainda que como a concentração crescesse o coeficiente de consistência também aumentou, mas o índice de comportamento de fluxo decresceu. Os valores de (n) índice de comportamento para suco de abacaxi foram mais altos que os de suco de laranja em condições idênticas, indicando pseudoplasticidade mais pronunciada no suco de abacaxi. Os autores presumem que a pseudoplasticidade foi provocada pela polpa fina suspensa nos sucos.

## **2.7 Influência das pectinas**

Pectinas são derivadas das "substâncias pécticas", que são os maiores componentes estruturais das paredes celulares das plantas, funcionando como substâncias de ligação e revestimento dos espaços intercelulares. Assim como todos os polissacarídeos, as pectinas apresentam a propriedade de reter moléculas de água, formando soluções coloidais e controlando a atividade de água de um sistema; ou seja, têm a função de agente espessante ou gelificante, estabilizantes de emulsões.

As substâncias pécticas estão presentes nas paredes celulares das plantas, onde funcionam como substâncias de ligação e revestimento nos espaços intercelulares. São identificadas também, ao lado de polissacarídeos algáceos e algumas hemiceluloses solúveis, como Fibra Alimentar Solúvel (FAZ).

Devido à presença de substâncias pécticas, a viscosidade aumenta, levando a dificuldades na clarificação e concentração dos sucos (NAGY et al.,1993).

O conteúdo de pectina tem influência importante nas características da parede celular. As paredes saturadas de pectina são aderentes e capazes de reter apreciáveis quantidades de água, enquanto que paredes livres de pectina são quebradiças, filáveis e menos hidrofílicas. Sob condições similares, paredes contendo pectina produzem sucos mais espessos (WHITTEMBERGER e NUTTING, 1957).

HOLDSWORTH (1971) afirma que o conteúdo de pectina em sucos e purês de várias frutas aparenta ser o principal responsável pelas características não-newtonianas, incluindo efeitos de tempo-dependência. Como exemplo cita suco de maçã despectinizado, que apresenta comportamento newtoniano, enquanto que o suco de maçã turvo mostra comportamento não-newtoniano e pseudoplástico para concentrações maiores que 50°Brix.

Segundo QUEIROZ (1998), as pectinas são consideradas como responsáveis pela principal contribuição na consistência do suco de tomate. WATSON (1968), trabalhando com purê de damasco, observaram que o suco concentrado apresenta um comportamento não-newtoniano mais acentuado do que o purê. A adição de pectinase resultou numa redução contínua do valor do índice de consistência (K) com o tempo.

SARAVACOS (1970) afirma que suco de maçã despectinizado comporta-se como fluido newtoniano para todas as concentrações (10° Brix a 80°Brix) na faixa de 20°C a 70°C. Sucos turvos, contendo quantidades significantes de partículas suspensas e coloidais mostraram-se mais viscosos que sucos despectinizados. Neste caso, o suco comportou-se como newtoniano abaixo de 50°Brix e para concentrações maiores comportou-se como fluido pseudoplástico.

SAENZ e COSTELL (1986) estudaram o comportamento reológico de três produtos derivados de limão: suco clarificado e concentrado a 62°Brix; suco não clarificado e concentrado a 45,5°Brix; triturado de limão a 9,5°Brix. O suco clarificado a 62°Brix apresentou escoamento newtoniano apenas entre 7° C e 50°C. O comportamento do suco não clarificado foi do tipo plástico para a temperatura de 7°C e pseudoplástico para temperaturas entre 22°C e 50°C. O triturado se comportou como fluido plástico para temperaturas entre 7°C e 50°C. Para valores de tensão de cisalhamento superiores à

tensão de escoamento estes dois últimos se comportaram como pseudoplásticos, o que confirma segundo os autores, o papel que as pectinas e a polpa suspensa têm nas características de comportamento deste tipo de produto.

CASTALDO *et al.* (1984), estudando purê de maçã observaram que o uso de pectinases e celulasas influem decisivamente nas propriedades reológicas do produto, diminuindo a tensão inicial ( $T_0$ ) e o índice de consistência ( $K$ ).

O mesmo foi observado por GHERARDI *et al.* (1985) estudando purê de pêra, os quais notaram que as mudanças no comportamento reológico seguiram das alterações no conteúdo de pectinas, polpa e sólidos insolúveis.

GARCIA *et al.* (1974), observaram que purês de frutas ao serem clarificados alteravam seu comportamento reológico, passando de pseudoplásticos a newtonianos.

TANGLERTPAIBUL e RAO (1987) estudando propriedades de escoamento de concentrado de tomate afirmam que o conteúdo de pectina no suco de tomate teve pequena influência sobre o índice de comportamento ( $n$ ). Afirmam que o valor de ( $n$ ) não varia com o conteúdo de pectina.

MANOHAR *et al.* (1990) estudaram propriedades de escoamento de polpa de manga e afirmam que o conteúdo de pectina teve um efeito pronunciado sobre a viscosidade. O índice de comportamento e a energia de ativação não variaram muito com o conteúdo desta pectina. Uma redução de 5.7% no conteúdo de pectina reduziu a viscosidade em aproximadamente 50%.

IBARZ *et al.* (1992) trabalharam com suco de pêssago despectinizado e clarificado nas concentrações de (40 a 69)°Brix e temperaturas de (5 a 45)°C e 60°C, nas quais observaram comportamento newtoniano das amostras em todos os casos devido, no seu entender, a ausência de pectinas e polpa suspensa.

IBARZ *et al.* (1996) constataram comportamento newtoniano no suco comercial de maracujá, à várias temperaturas. Segundo os autores, a baixa concentração de sólidos no suco foi responsável por tal comportamento.

## **2.8 Influência dos sistemas de medida nas propriedades reológicas**

Segundo PELEGRINE (1999), provavelmente, a dificuldade freqüentemente encontrada na reprodução de muitos dados experimentais encontrados na literatura pode ser explicada através do uso dos diferentes sistemas de medidas utilizados.

GEHRKE (1996) mediu a viscosidade dos sucos concentrados de caju, laranja, limão e maracujá, com o objetivo de comparar resultados obtidos nos sistemas de medidas de placas paralelas e cilindros concêntricos, e observou uma diferença no valor da viscosidade aparente para dois reogramas, para uma mesma temperatura e concentração.

SMITH *et al.* (1984) afirmam que quando um fluido não newtoniano é reologicamente testado através de viscosímetros de cilindros concêntricos, existe um erro de medida relacionado com a

magnitude do espaço vazio existente entre os cilindros externo e interno. Segundo os autores, o valor desse erro se aproxima de zero, conforme a razão entre os raios dos dois cilindros se aproxima da unidade.

Das observações acima, pode-se concluir como é importante a indicação de um sistema de medidas utilizado em testes reológicos tanto na minimização dos erros como também nas comparações e reproduções dos dados.

## **2.9 Influência das partículas suspensas no comportamento reológico**

Na descrição de Whitenberger e Nutting (1957) a consistência depende largamente da quantidade, forma, grau de subdivisão e caráter das paredes celulares presentes. Vários fatores influenciam a quantidade de paredes celulares no suco, dentre eles estão a maturidade, diferenças de espessura das paredes celulares e maneira de extrair ou fragmentar os frutos para fazer o suco.

HAND *et al.* (1955) estudando viscosidade de suco de tomate verificaram que larga faixa de viscosidades pode ser obtida por ajuste da despulpadeira. A despulpadeira mostrou ter grande influência no controle da viscosidade. Estudo microscópico indicou que a maior parte da viscosidade é devida principalmente ao número e forma das partículas suspensas. Dizem estes autores que partículas alongadas têm maior efeito sobre a viscosidade que partículas esféricas. Assim, fragmentação de partículas celulares com forma predominantemente esférica em um suco, por fragmentação parcial, aumentaria a viscosidade.

Embora dois sucos possam conter quantidades idênticas de paredes celulares eles podem ter diferentes consistências por causa de diferentes configurações ou arranjo estrutural das paredes (QUEIROZ, 1998).

Em geral paredes de forma laminar ou em forma de bastão ou ainda fragmentadas oferecem mais resistência ao escoamento e dão sucos com estruturas mais estáveis do que paredes esféricas. A irregularidade da forma da parede celular depende muito do tratamento mecânico nas paredes recebido durante a manufatura do suco (WHITTEMBERGER; NUTTING, 1957).

SARAVACOS (1970) estudando purês de pêra, pêsego e maçã, afirma que a viscosidade depende principalmente da concentração, tamanho e forma das partículas suspensas, sendo a contribuição do soro, para a referida propriedade, relativamente pequena, exceto em purês concentrados.

WHITTEMBERGER e NUTTING (1957), já haviam obtido resultados semelhantes: a consistência de suco de tomate depende em parte da sua concentração química e em parte da sua estrutura física. Constataram que a consistência dos sucos variou com a estrutura dos constituintes insolúveis. Sucos contendo quantidades variáveis de paredes celulares mostraram grande incremento na consistência, enquanto que sucos com numerosa quantidade de grânulos insolúveis, mas sem a presença de paredes celulares, foi pouco afetado. Em seu trabalho o suco de tomate foi homogeneizado, transformando partículas dissolvidas esféricas em partículas com forma alongada e

reduzindo seu tamanho, o que provocou incremento na consistência do suco. Os resultados indicam a importância de estruturas celulósicas tanto na manutenção da consistência como no aumento desta após a homogeneização.

Para uma mesma temperatura a magnitude do índice de comportamento ( $n$ ) decresceu com o incremento no conteúdo de polpa, isto é, o incremento no conteúdo de polpa tomou as amostras mais pseudoplásticas. Os autores atribuem o fenômeno possivelmente ao incremento na interação partícula-partícula, partícula-soro e competição por hidratação pela água disponível, da polpa e de vários solutos, O incremento no índice de consistência também seria devido a estas hidratações (VITTALI e RAO, 1984).

JINESCU (1974), afirma que em soluções de partículas de quartzo suspensas em água, com diâmetro maior que 10 microns, a viscosidade aumenta linearmente com o diâmetro da partícula.

MISSAIRE *et al.* (1991) trabalhando com maçã, obtiveram que a magnitude da tensão de escoamento de suspensões de polpa de maçã aumentou com o incremento do conteúdo de polpa e a tensão de escoamento das suspensões aumentou com o incremento no tamanho das partículas, em concordância com os resultados a respeito das suspensões não alimentícias citadas por Jinescu (1974).

HARPER e EL SAHRIGI (1965) estudando propriedades microestruturais de suspensões densas de esferas com diâmetro maior que 20 nm afirmam que o comportamento microestrutural de suspensões coloidais depende do tamanho das partículas, estado de agregação e fração do volume.

QIU e RAO (1988), trabalhando com compota de maçã homogeneizada e partículas com uma grande faixa de distribuição de tamanhos mostraram que a tensão de escoamento deste produto aumenta com o decréscimo no tamanho médio das partículas, resultado oposto ao relatado por Jenescü (1974). Os autores atribuem a diferença nos resultados ao fato de se ter produtos estruturados e não estruturados.

TRIFIRÒ *et al.* (1987) examinaram a influência do conteúdo e do tamanho de partículas suspensas sobre as propriedades reológicas em purê de damasco e concluíram que o incremento no tamanho da partícula conduzia a um progressivo decréscimo no valor do índice de consistência ( $k$ ) e um incremento no índice de comportamento ( $n$ ). Ao contrário, o efeito do tamanho das partículas decresceu consideravelmente com o decréscimo da concentração de partículas em suspensão e quase pareceu ocorrer uma inversão da dependência porque ao se aumentar o diâmetro da partícula, o índice de consistência ( $k$ ) tendeu a um leve aumento e o índice de comportamento ( $n$ ) a uma leve diminuição. Os autores acrescentam que as partículas que constituem a polpa tendem a formar agregados que resultam tanto mais estáveis quanto menores forem as dimensões das partículas. Afirmam também que o refinamento do purê tem um efeito amplo e oposto: de um lado aumenta a fluidez pela remoção de certo percentual de polpa e de outro aumenta um pouco a viscosidade por causa da fragmentação mecânica da partícula.

COSTELL *et al.* (1982) estudando a reologia de purê de damasco afirmam que o índice de consistência ( $k$ ) depende principalmente da percentagem de polpa e do tamanho médio das partículas

suspensas; o grau de pseudoplasticidade, representado pelo valor do índice de comportamento ( $n$ ), está muito relacionado com o tamanho médio das partículas da fase dispersa; a tensão inicial de escoamento ( $\tau_0$ ), depende das percentagens de polpa e de células rompidas, do tamanho médio das partículas, da acidez e do conteúdo de substâncias pécticas. A tensão de escoamento de Bingham ( $Tb$ ), do conteúdo de polpa, percentagem de células rompidas e da acidez; a viscosidade a um gradiente de deformação infinito ( $t$ ) depende a viscosidade do soro, do tamanho médio das partículas e da acidez. Os pesquisadores concluem: quanto maior é o tamanho médio das partículas suspensas, menor é o valor do índice de comportamento ( $n$ ) e, portanto o comportamento do purê é mais pseudoplástico.

Isto concorda com a teoria de que a pseudoplasticidade dos sistemas dispersos é o reflexo de uma alteração estrutural provocada pelo cisalhamento. Este cisalhamento produz uma ruptura progressiva na estrutura formada pelas partículas e macromoléculas até induzir que elas se orientem em sentido paralelo ao escoamento, resultados idênticos aos obtidos por (HOLDSWORTH, 1973).

A estreita relação entre índice de consistência ( $k$ ) e o índice de comportamento ( $n$ ), parâmetros que definem o caráter pseudoplástico do escoamento do purê de damasco, e a quantidade e características da polpa confirmam a teoria de que nos sistemas dispersos o caráter não newtoniano do comportamento reológico está diretamente relacionado com as características da fase dispersa. Experimentalmente foi comprovado que a eliminação da polpa por centrifugação dá lugar a uma importante modificação reológica. Observou-se que o comportamento do produto resultante (soro) é newtoniano ou plástico de Bingham (COSTELL e DURAN, 1982).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Obtenção da polpa**

Para a obtenção da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), foram escolhidos frutos maduros, provenientes da cidade de Ilhéus, BA. Os cupuaçus foram transportados sob refrigeração, para o Campus da UESB em Itapetinga, onde se realizou a extração da polpa, conforme descrito no item 3.2.

As polpas foram obtidas dos bagos de cupuaçus congelados. O despulpamento foi feito em despulpadeira horizontal pertencente ao Laboratório de Tecnologia de Produtos de Origem Vegetal da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. As polpas foram embaladas em porções de aproximadamente 600g em embalagem de polietileno identificadas e congeladas em freezer horizontal (-18°C).

#### **3.2 Preparo das amostras**

Um dia antes de serem utilizadas, as polpas foram colocadas em refrigerador para o descongelamento.

As polpas foram concentradas no Evaporador Rotativo SL 126 – SOLAB pertencente ao Centro de Difusão e Tecnologia de Alimentos (CEDETEC), Laboratório de Propriedades Físicas de materiais biológicos da Universidade Estadual do Sudeste da Bahia (UESB) submetida inicialmente à tempo e temperatura de pasteurização – 80°C/15min e em seguida ajustada a temperatura para 70°C e o tempo estabelecido dependeu da concentração desejada da polpa.

Foram utilizadas as concentrações de (14° “in natura”, 17°, 19°, 23° e 25)°Brix.

As polpas foram armazenadas em sacos plásticos selados, em seladora industrial, identificadas e levadas ao congelamento em freezer, em porções adequadas, prontas para serem submetidas às análises físicas e químicas, reológicas e termofísicas. Por exemplo, para análise reológica, foram feitos testes no reômetro utilizando torque e velocidades mínimas e máximas para identificar qual seria o melhor spindle a ser utilizado e pesaram-se 25 gramas das amostras previamente concentradas, acondicionou-se em saquinhos plásticos, identificou-se, selou-se e levou-se ao congelamento, para evitar o descongelamento desnecessário de polpa que não seria utilizada. Essa é a quantidade necessária para leitura no reômetro, evitando desperdício da polpa. E para utilização da polpa, esta foi descongelada sob temperatura de refrigeração.

#### **3.3 Análises físicas e químicas**

Com o objetivo de caracterizar a polpa de cupuaçu, as seguintes determinações foram realizadas segundo os métodos AOAC (1990), INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1985), PEARSON

(1976), encontrados no Apêndice A: pH, umidade, acidez total, Brix, açúcares redutores, cinzas e pectina.

### 3.3.1 – Sólidos Solúveis

O conteúdo de sólidos solúveis foi determinado por meio de um refratômetro digital (ATAGO Hand refractometer, precisão 0,2%) e expresso em graus Brix, inseriu-se uma pequena quantidade de amostra no equipamento devidamente calibrado com água destilada à temperatura ambiente e realizou-se a leitura, conforme descrito no Apêndice A.

### 3.3.2 – pH

O pH foi determinado pelo método potenciométrico descrito no apêndice A. Um pHmetro de bancada (Quimis, precisão 0,01 pH), calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, foi utilizado para a determinação do pH da polpa, as amostras foram diluídas em 50% e inseriu-se o potenciômetro diretamente na solução

### 3.3.3 – Atividade de água

A atividade de água foi medida em um instrumento digital Aqua-Lab, modelo CX-2, fabricado pela Decagon Devices Inc., EUA (Figura 5). Tomou-se a média aritmética de 3 leituras. A temperatura das amostras foi controlada por um banho termostático, para manter constante a temperatura ( $25 \pm 0,3$  °C), antes das análises, facilitando as mesmas, pela diminuição do tempo de estabilização do aqualab. As amostras foram dispostas em recipientes plásticos aproximadamente 5,0g da amostra, para fazer as leituras.



**Figura 5 – O determinador de atividade de água (AQUALAB) do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos do CEDETEC/UESB.**

### **3.4 Medidas reológicas**

As leituras para determinação das medidas reológicas foram realizadas em um reômetro rotativo marca Brookfield, modelo DVII+Pro, fabricado por Brookfield Engineering Laboratories, Inc.,E.U.A.

Testes preliminares permitiram verificar que as leituras poderiam ser efetuadas utilizando-se um sistema de cilindros concêntricos, com o spindle LV 4 (Figura 6) para todas as amostras.



**Figura 6 - Spindle LV-4 utilizado na obtenção dos dados reológicos.**

Testes preliminares também permitiram determinar o tempo necessário para o equilíbrio inicial das amostras que foi de 40 segundos de aplicação da tensão de cisalhamento.

As tomadas de dados foram feitas, aumentando-se a rotação do spindle, desde um nível mínimo em que a tensão fosse superior a 15% da tensão mínima de leitura até um máximo, em que a tensão fosse inferior a 85% da tensão máxima do spindle. Esta técnica foi adotada para garantir

leituras precisas do aparelho, uma vez que o fabricante recomenda uma faixa de 10 a 90% da tensão máxima.

Para cada combinação de temperatura e concentração, se encontrou a faixa de leituras, em experimento teste.

Estabelecida a faixa de medição, esta foi dividida em pelo menos 12 pontos de leitura. Assim, o reômetro foi programado para iniciar, acionando o splindle na tensão mais baixa, esperar 40 s e realizar 5 medições de viscosidade, uma a cada 5 segundos, e armazenar a média, aumentar a tensão, para o próximo valor da faixa esperar, novamente, 40s, realizar 5 medições de viscosidade e armazenar a média. O processo continuou, na próxima tensão, dentro da faixa, até o valor máximo. Ao atingir o valor máximo, novamente se esperou 40 segundos e se repetiu o processo de armazenamento de médias de 5 leituras de viscosidade, em cada tensão, porém, diminuindo-se a tensão aplicada, até o valor mínimo. Foram realizados, três destes ciclos de leitura. A Figura 7 mostra um fluxograma da programação do reômetro.

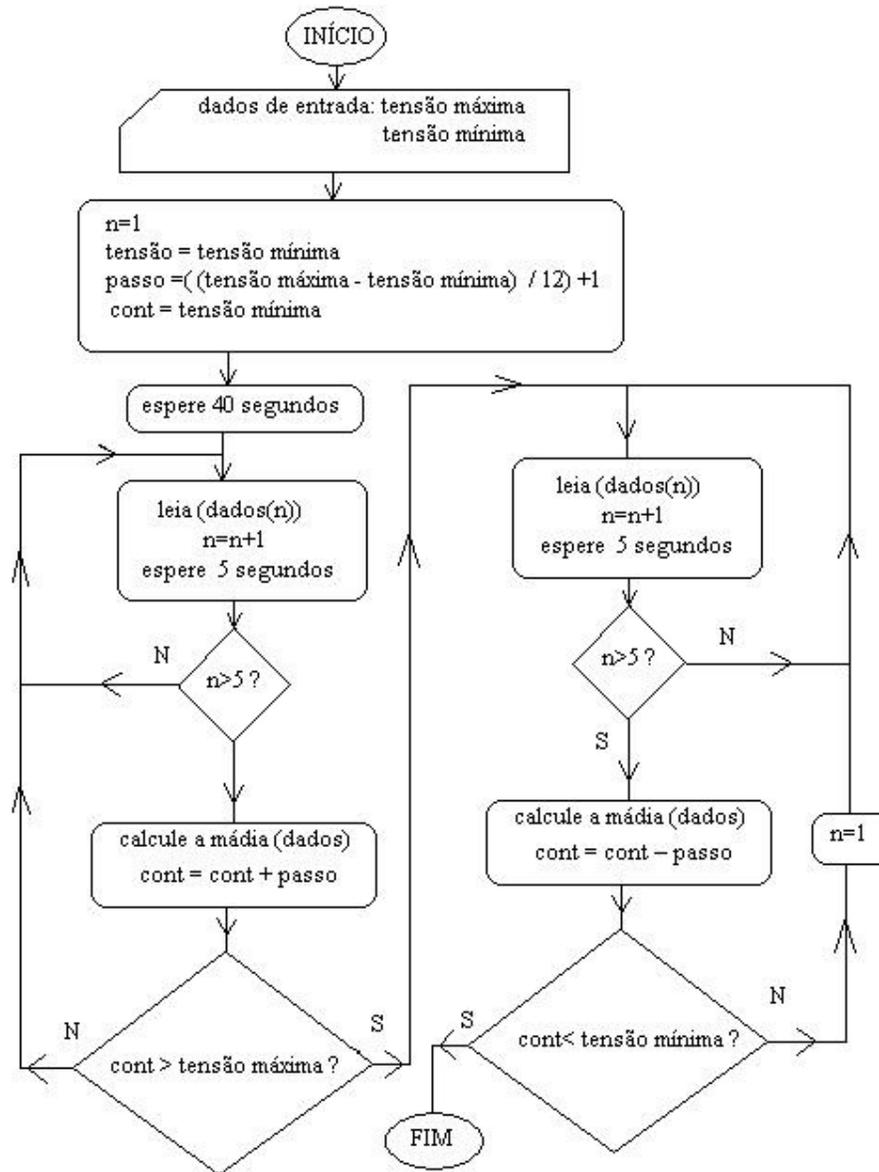
Cada ensaio foi feito em três repetições para cada uma das temperaturas e concentrações de polpa de cupuaçu. Os resultados foram registrados pelo software Rheocalc em computador acoplado no equipamento. Posteriormente os dados foram colados em planilhas do Excel ou dos softwares estatísticos usados.

Um banho termostático Brookfield TC-500 (Brookfield Engineering Laboratories, Massachussets, EUA), teve sua saída de água acoplada ao cilindro encamisado do reômetro, que contém a amostra. A temperatura foi, assim, ajustadas em (20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70)°C. Sendo o ajuste conferido pela leitura e registro da temperatura da polpa, pelo sensor de temperatura do reômetro.

Para a realização das análises reológicas, foi utilizado para cada medida 11 ml de amostra aproximadamente, sendo esta mantida na temperatura de análise por 5 minutos para estabilização, antes de se iniciar a coleta de dados com o reômetro.

### **3.5 Análise dos resultados para as propriedades reológicas**

Os dados oriundos do software Rheocalc, foram convertidos em planilhas, do Microsoft Excel sendo rearranjados, convenientemente para determinações preliminares de estatísticas descritivas e análises de homogeneidade de variâncias (Kolmogorov-Smirnof) de normalidade de distribuição de erros (lilliefors) que são pressupostos da análise de regressão. Estas análises foram feitas por meio de programa feito em VBScript, para o Excel.



**Figura 7. Fluxograma da Programação do reômetro**

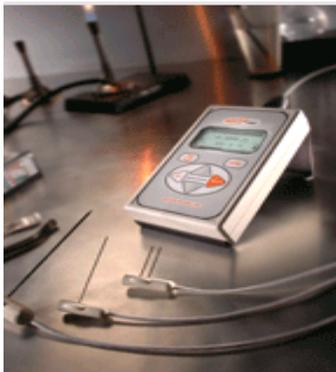
O software Microcal Origin (Vrs.6,0) foi utilizado para ajustar, os modelos reológicos, tendo sido ajustados, para a relação taxa X tensão de cisalhamento, os seguintes modelos: Bingham; Casson; Casson generalizado; Heinz; Herschel-Bulckey; Schulmann-Haroske-Reher; Mizrahi&Berk e Windhab.

Entre os critérios de seleção do modelo que melhor se ajuste, foram usados pela ordem, o coeficiente de determinação  $R^2$  corrigido para falta de ajustamento, considerando os modelos que apresentarem valores de  $R^2$  entre  $1 < R^2 > 0,8$ , a estatística  $\chi^2$  sendo desconsiderados os modelos para os quais se obteve  $\chi^2$  distantes de zero.

### 3.6 Análises Termofísicas

#### 3.6.1 Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico

As propriedades termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico) das polpas de cupuaçu, foram determinadas nas temperaturas de (20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70)°C, utilizando-se o aparelho KD2-PRO da Decagon Devices Inc. 2365 NE Hopkins Court Pullman, WA 99163 (USA) (Figura 8) que utiliza o método da sonda quente e mede estas propriedades com 10% de precisão e cujas especificações técnicas (faixas de medida) são: condutividade térmica-0,002 à 2W/m°C; difusividade térmica- (0,1 à 1) mm<sup>2</sup>/s; resistividade térmica- (0,5 à 10) m°C/W. Este aparelho disponibiliza três tipos de sonda específica para cada tipo de produto, sendo que a utilizada no experimento foi a SH-1, é uma sonda que possui agulha dupla e é ideal para materiais de maior viscosidade.



**Figura 8 - O KD-2 PRO do laboratório de propriedades físicas de materiais biológicos do CEDETEC/UESB.**

Para estas análises, as amostras de polpa foram colocadas em béqueres de vidro de 100 mL. Estes béqueres foram imersos em banho-termostático com controle digital de temperatura (Brookfield TC-500-Brookfield Engineering Laboratories, Massachussets, EUA), para estabilização da temperatura da amostra, conforme ilustrado na Figura 9.



**Figura 9 - Sistema utilizado na medição das propriedades termofísicas.**

A sonda foi posicionada no centro da amostra e após aguardar um tempo aproximado de 15 minutos, para estabilização da temperatura, foi executada a leitura das propriedades termofísicas (condutividade térmica, calor específico volumétrico e difusividade térmica).

### 3.6.2 Massa específica

A determinação da massa específica foi feita por meio do método picnométrico, em triplicata. Para cada temperatura de interesse (mantida constante utilizando-se um banho termostático, (Marca Quimis – precisão de  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), o picnômetro de 25 ml, lavado e seco foi pesado vazio em uma balança analítica, e sua massa devidamente registrada. Em seguida, um picnômetro foi preenchido com água destilada na temperatura de trabalho, e sua massa medida, obtendo dessa forma o volume exato do picnômetro (calibração). Em seguida, o mesmo foi limpo como mencionado anteriormente e preenchido com a amostra na concentração e temperatura de interesse e pesado em uma balança analítica, com sua massa devidamente registrada. O valor da massa específica para a amostra foi dado então pela Equação 21.

$$\rho_A = \rho_{H_2O} \cdot \frac{(m_A - m_V)}{(m_{H_2O} - m_V)} \quad (21)$$

Onde:  $\rho_A$  é a massa específica da amostra ( $\text{g/cm}^3$ ) a uma dada temperatura,  $\rho_{H_2O}$  é a massa específica da água ( $\text{g/cm}^3$ ) na mesma temperatura,  $m_A$  é a massa (g) do picnômetro cheio da amostra,  $m_{H_2O}$  é a massa do picnômetro (g) cheio de água e  $m_V$  é a massa do picnômetro (g) vazio.

### 3.6.3 Condutividade elétrica

As leituras da condutividade foram realizadas utilizando um condutivímetro digital, com as amostras nas temperaturas de (20, 25, 30, 40, 50, 60 e 70)°C, mantidas em banho termostático, como já descrito, para as análises termofísicas.

### 3.7 Análise dos resultados das propriedades físicas

Para as variáveis cujas medidas foram feitas conforme descrito nos itens 3,6 a 3,7, modelos de regressão foram ajustados utilizando-se o software MICROCAL-ORIGIN (Vrs 6.0 ). Análises de regressão foram feitas, buscando modelos que descrevessem a relação das variáveis estudadas com a temperatura e o teor de sólidos solúveis da polpa. Também se buscou modelos que relacionassem as variáveis entre si e os parâmetros reológicos, obtidos do melhor modelo, estabelecido no item 3.5 foram correlacionados com as demais variáveis termofísicas determinadas nos itens 3.6 a 3.7.

Para se chegar nos intervalos de confiança das propriedades termofísicas, baseou-se na distribuição de t, que segundo Matos (1995) a estatística t tem por finalidade testar a significância dos parâmetros estimados do modelo, o que equivale ao teste do efeito individual de X e do termo constante. Portanto, é definida para cada um dos parâmetros estimados. Este teste t é usado principalmente para testar hipótese nula de que “não há diferença”, isto é, hipótese nula

$$\mu_1 - \mu_2 = 0 \text{ (ou simplesmente } \mu_1 = \mu_2 \text{)}$$

A forma deste teste pode ser simplificada, notando-se que ele envolve uma estimativa do desvio padrão, que supomos ser o mesmo nas duas populações. Essa estimativa é chamada desvio-padrão combinado.

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

O valor do desvio padrão combinado s situa-se sempre entre os valores de  $s_1$  e  $s_2$ . Com esta notação, a estatística de teste pode escrever-se como estatística para o teste da diferença entre médias (pequenas amostras), (FREUND E SIMON, 1997):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Polpa cupuaçu *in natura* - Caracterização

A caracterização físico-química das amostras utilizadas nos experimentos está apresentada na tabela 2:

**Tabela 2. Caracterização da polpa de cupuaçu**

DETERMINAÇÕES	POLPA CUPUAÇU
Açúcares redutores (%)	2,3006±0,2581
Cinzas (%)	0,6560±0,0196
Pectina (g/100g de pectato de cálcio)	0,8546±0,0070
Acidez (% ácido cítrico)	2,90±0,02
Brix (20° C)	14,0°±0,1
pH	3,21±0,01
a <sub>w</sub>	0,989±0,001

É possível observar na tabela 3, que a polpa *in natura* apresentou um teor de sólidos solúveis totais de 14°Brix e pH 3,21, estes valores encontram-se acima dos valores apresentados por Matos *et al.* (2008)- 13,44 a 13,79 e 2,98 a 3,08 respectivamente. Quanto à acidez 2,9%, situou-se dentro da faixa obtida por Matos *et al.* (2008) – 2,92 a 3,23%. Para diferentes tipos de cupuaçuzeiros cultivados na região sul da Bahia.

### 4.2 Modelos reológicos

O coeficiente de determinação usado para discutir os modelos utilizados foi o R<sup>2</sup> corrigido para falta de ajustamento.

Os valores dos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) e da estatística ( $\chi^2$ ) para os modelos ajustados correlacionando taxa e tensão de cisalhamento, para cada temperatura (TEMP) e teor de sólidos solúveis totais (SST) encontra-se na Tabela 3. Observou-se que o modelo de Windhab foi o que apresentou os maiores valores de R<sup>2</sup> e menores de  $\chi^2$  em todas as temperaturas e concentrações. Tendo sido, em alguns casos, igualado por outros modelos, no que se refere ao coeficiente de determinação tendo, contudo, apresentado menores valores de coeficiente estatístico.

Foram ajustados modelos para as duas situações distintas: quando a tensão estava sendo aumentada (IDA) e quando a tensão estava sendo diminuída (VOLTA), a existência de diferença entre os parâmetros do melhor modelo, em cada caso, foi que determinou a existência ou não da característica de tixotropismo, ou seja, histerese nas curvas, com diferença entre as tensões de cisalhamento quanto houve aumento da taxa em relação à diminuição.

**Tabela 3. Valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e da estatística ( $\chi^2$ ) para os modelos ajustados correlacionando taxa e tensão de cisalhamento, para cada temperatura (TEMP) e teor de sólidos solúveis totais (SST), para as duas situações distintas: quando a tensão estava sendo aumentada (IDA) e quando da tensão estava sendo diminuída (VOLTA)**

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			$\chi^2$	$R^2$	$\chi^2$	$R^2$
CASSON	20	14	10,070	0,91	48,655	0,69
CASSON	20	17	13,173	0,94	31,498	0,86
CASSON	20	19	3,162	0,99	11,230	0,97
CASSON	20	23	6,895	0,88	3,354	0,95
CASSON	20	25	28,971	0,66	110,463	0,16
CASSON	25	14	23,723	0,83	23,723	0,83
CASSON	25	17	51,619	0,78	49,542	0,77
CASSON	25	19	3,224	0,99	2,984	0,99
CASSON	25	23	14,478	0,96	18,822	0,94
CASSON	25	25	198,517	0,80	62,567	0,00
CASSON	30	14	8,994	0,91	8,994	0,91
CASSON	30	17	25,131	0,90	15,568	0,93
CASSON	30	19	2,249	0,99	2,094	0,99
CASSON	30	23	6,655	0,95	3,616	0,98
CASSON	30	25	4,371	0,97	2,235	0,98
CASSON	40	14	3,097	0,97	18,114	0,80
CASSON	40	17	17,133	0,93	16,931	0,94
CASSON	40	19	4,399	0,98	1,553	0,99
CASSON	40	23	3,850	0,99	10,863	0,97
CASSON	40	25	49,286	0,94	150,850	0,85
CASSON	50	14	620	0,81	17,696	0,05
CASSON	50	17	4,547	0,96	4,547	0,96
CASSON	50	19	0,599	0,99	0,212	1,00
CASSON	50	23	1,746	0,99	57,291	0,90
CASSON	50	25	13,013	0,93	13,145	0,93
CASSON	60	14	2,844	0,79	1,478	0,74
CASSON	60	17	11,322	0,88	8,059	0,92
CASSON	60	19	17,988	0,91	4,095	0,97
CASSON	60	23	9,295	0,18	0,940	0,76
CASSON	60	25	191,528	0,74	109,503	0,85

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			X <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
CASSON	70	14	1,676	0,96	1,173	0,96
CASSON	70	17	9,261	0,94	10,963	0,93
CASSON	70	19	4,429	0,98	3,956	0,99
CASSON	70	23	91,172	0,41	66,525	2,01
CASSON	70	25	44,316	0,82	18,785	0,91
HEINZ	20	14	14,098	0,87	55,705	0,65
HEINZ	20	17	19,350	0,91	39,538	0,83
HEINZ	20	19	5,687	0,99	16,892	0,95
HEINZ	20	23	8,349	0,85	3,514	0,95
HEINZ	20	25	29,238	0,66	102,918	0,19
HEINZ	25	14	29,186	0,79	29,186	0,79
HEINZ	25	17	59,676	0,75	61,105	0,72
HEINZ	25	19	5,157	0,98	4,790	0,98
HEINZ	25	23	15,204	0,95	19,059	0,94
HEINZ	25	25	100,219	0,00	35,318	0,22
HEINZ	30	14	12,297	0,88	12,297	0,88
HEINZ	30	17	32,159	0,88	22,201	0,91
HEINZ	30	19	3,522	0,99	3,937	0,99
HEINZ	30	23	7,872	0,94	5,648	0,98
HEINZ	30	25	4,101	0,97	2,306	0,98
HEINZ	40	14	5,119	0,95	21,808	0,77
HEINZ	40	17	23,891	0,91	21,854	0,92
HEINZ	40	19	5,875	0,98	2,393	0,99
HEINZ	40	23	6,153	0,98	14,138	0,96
HEINZ	40	25	62,123	0,92	190,485	0,82
HEINZ	50	14	5,486	0,77	5,615	0,38
HEINZ	50	17	6,821	0,93	6,821	0,93
HEINZ	50	19	0,759	0,99	0,327	1,00
HEINZ	50	23	2,163	0,99	73,787	0,87
HEINZ	50	25	7,994	0,96	13,503	0,93
HEINZ	60	14	1,844	0,86	1,173	0,79
HEINZ	60	17	6,440	0,93	4,138	0,96
HEINZ	60	19	14,284	0,93	2,342	0,99
HEINZ	60	23	8,927	0,19	0,923	0,77
HEINZ	60	25	123,797	0,83	60,523	0,91

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			X <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	χ <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
HEINZ	70	14	2,483	0,94	1,527	0,95
HEINZ	70	17	12,981	0,91	15,025	0,91
HEINZ	70	19	7,486	0,97	6,440	0,98
HEINZ	70	23	55,610	0,00	27,619	0,00
HEINZ	70	25	38,279	0,84	18,213	0,91
BINGHAM	20	14	23,547	0,79	74,686	0,54
BINGHAM	20	17	34,758	0,85	62,270	0,73
BINGHAM	20	19	15,238	0,96	31,885	0,90
BINGHAM	20	23	11,939	0,79	4,614	0,94
BINGHAM	20	25	33,383	0,61	92,315	0,24
BINGHAM	25	14	42,189	0,70	42,189	0,70
BINGHAM	25	17	88,473	0,64	88,522	0,61
BINGHAM	25	19	10,762	0,96	10,125	0,96
BINGHAM	25	23	20,497	0,94	22,370	0,92
BINGHAM	25	25	115,179	0,01	38,440	0,18
BINGHAM	30	14	19,910	0,81	19,910	0,81
BINGHAM	30	17	51,666	0,81	39,110	0,84
BINGHAM	30	19	9,400	0,97	10,606	0,97
BINGHAM	30	23	11,011	0,92	12,990	0,95
BINGHAM	30	25	4,459	0,97	3,856	0,96
BINGHAM	40	14	10,242	0,89	32,707	0,66
BINGHAM	40	17	39,707	0,85	36,948	0,86
BINGHAM	40	19	11,495	0,96	6,623	0,96
BINGHAM	40	23	12,447	0,96	23,153	0,93
BINGHAM	40	25	102,048	0,8	274,895	0,74
BINGHAM	50	14	7,492	0,70	6,614	0,30
BINGHAM	50	17	12,509	0,88	12,509	0,88
BINGHAM	50	19	1,409	0,98	0,768	0,99
BINGHAM	50	23	3,812	0,98	112,178	0,80
BINGHAM	50	25	16,559	0,92	13,544	0,93
BINGHAM	60	14	2,844	0,79	1,478	0,74
BINGHAM	60	17	11,322	0,88	8,059	0,92
BINGHAM	60	19	17,988	0,91	4,095	0,97
BINGHAM	60	23	9,295	0,18	0,940	0,76
BINGHAM	60	25	191,528	0,74	109,503	0,85
BINGHAM	70	14	4,444	0,89	2,394	0,91
BINGHAM	70	17	21,937	0,86	22,426	0,85
BINGHAM	70	19	15,593	0,94	13,299	0,95
BINGHAM	70	23	88,036	0,34	28,732	0,00
BINGHAM	70	25	31,110	0,87	19,492	0,90

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			X,	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
BINGHAM	70	14	4,444	0,89	2,394	0,91
BINGHAM	70	17	21,937	0,86	22,426	0,85
BINGHAM	70	19	15,593	0,94	13,299	0,95
BINGHAM	70	23	88,036	0,34	28,732	0,00
BINGHAM	70	25	31,110	0,87	19,492	0,90
CASSON GENERALIZADO	20	14	86,004	0,36	167,785	0,17
CASSON GENERALIZADO	20	17	137,569	0,48	179,960	0,34
CASSON GENERALIZADO	20	19	16,940	0,96	33,617	0,90
CASSON GENERALIZADO	20	23	9,459	0,83	3,557	0,95
CASSON GENERALIZADO	20	25	28,658	0,66	105,238	0,18
CASSON GENERALIZADO	25	14	121,624	0,28	121,624	0,28
CASSON GENERALIZADO	25	17	256,495	0,17	248,545	0,15
CASSON GENERALIZADO	25	19	11,929	0,96	11,448	0,96
CASSON GENERALIZADO	25	23	14,932	0,95	18,774	0,94
CASSON GENERALIZADO	25	25	103,322	0,00	35,391	0,22
CASSON GENERALIZADO	30	14	77,125	0,37	77,125	0,37
CASSON GENERALIZADO	30	17	197,312	0,38	160,445	0,42
CASSON GENERALIZADO	30	19	13,176	0,96	13,543	0,96
CASSON GENERALIZADO	30	23	9,570	0,93	8,224	0,97
CASSON GENERALIZADO	30	25	4,350	0,97	2,228	0,98
CASSON GENERALIZADO	40	14	52,926	0,51	40,871	0,59
CASSON GENERALIZADO	40	17	150,815	0,49	140,327	0,54
CASSON GENERALIZADO	40	19	16,889	0,94	11,454	0,94
CASSON GENERALIZADO	40	23	22,824	0,93	34,976	0,90
CASSON GENERALIZADO	40	25	84,152	0,90	226,960	0,78
CASSON GENERALIZADO	50	14	30,198	0,11	11,757	0,04
CASSON GENERALIZADO	50	17	71,200	0,42	71,200	0,42
CASSON GENERALIZADO	50	19	3,119	0,96	1,764	0,97
CASSON GENERALIZADO	50	23	7,363	0,95	262,546	0,57
CASSON GENERALIZADO	50	25	13,013	0,93	13,145	0,93
CASSON GENERALIZADO	60	14	13,544	0,22	6,602	0,15
CASSON GENERALIZADO	60	17	60,880	0,44	49,109	0,56
CASSON GENERALIZADO	60	19	55,423	0,73	28,132	0,83
CASSON GENERALIZADO	60	23	8,353	0,23	0,922	0,77
CASSON GENERALIZADO	60	25	182,013	0,76	98,067	0,86
HERSCHEL-BULCKEY	20	14	1,911	0,98	3,988	0,97
HERSCHEL-BULCKEY	20	17	1,083	1,00	8,453	0,96
HERSCHEL-BULCKEY	20	19	1,956	1,00	4,185	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	20	23	3,476	0,94	3,450	0,95
HERSCHEL-BULCKEY	20	25	30,888	0,64	61,709	0,46

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
HERSCHEL-BULCKEY	25	14	8,610	0,93	8,610	0,93
HERSCHEL-BULCKEY	25	17	16,610	0,93	16,548	0,92
HERSCHEL-BULCKEY	25	19	0,913	1,00	1,175	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	25	23	14,157	0,96	18,231	0,94
HERSCHEL-BULCKEY	25	25	83,797	0,07	34,774	0,23
HERSCHEL-BULCKEY	30	14	2,351	0,98	2,351	0,98
HERSCHEL-BULCKEY	30	17	6,289	0,98	2,533	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	30	19	2,086	0,99	1,275	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	30	23	4,009	0,97	2,632	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	30	25	4,222	0,97	2,282	0,98
HERSCHEL-BULCKEY	40	14	0,443	1,00	0,499	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	40	17	3,466	0,99	2,536	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	40	19	3,596	0,99	1,393	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	40	23	0,787	1,00	2,872	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	40	25	40,081	0,95	78,324	0,92
HERSCHEL-BULCKEY	50	14	3,024	0,87	3,599	0,57
HERSCHEL-BULCKEY	50	17	0,505	1,00	0,505	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	50	19	0,560	0,99	0,137	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	50	23	1,676	0,99	18,265	0,97
HERSCHEL-BULCKEY	50	25	3,132	0,98	14,121	0,93
HERSCHEL-BULCKEY	60	14	0,520	0,96	0,825	0,85
HERSCHEL-BULCKEY	60	17	0,610	0,99	0,154	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	60	19	9,188	0,95	0,312	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	60	23	5,253	0,47	0,964	0,77
HERSCHEL-BULCKEY	60	25	32,838	0,95	13,409	0,98
HERSCHEL-BULCKEY	70	14	0,194	1,00	0,401	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	70	17	1,669	0,99	2,226	0,99
HERSCHEL-BULCKEY	70	19	0,198	1,00	0,234	1,00
HERSCHEL-BULCKEY	70	23	54,800	0,00	27,835	0,00
HERSCHEL-BULCKEY	70	25	33,515	0,86	18,620	0,91
MIZRAHI&BERK	20	14	2,259	0,98	3,988	0,97
MIZRAHI&BERK	20	17	1,083	1,00	8,453	0,96
MIZRAHI&BERK	20	19	2,304	0,99	4,155	0,99
MIZRAHI&BERK	20	23	3,476	0,94	3,428	0,95
MIZRAHI&BERK	20	25	29,580	0,67	62,204	0,45
MIZRAHI&BERK	25	14	8,610	0,93	8,610	0,93
MIZRAHI&BERK	25	17	16,610	0,93	16,548	0,92
MIZRAHI&BERK	25	19	0,881	1,00	1,232	1,00
MIZRAHI&BERK	25	23	14,467	0,96	18,557	0,94
MIZRAHI&BERK	25	25	89,082	0,02	35,530	0,22

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
MIZRAHI&BERK	30	14	1,666	0,98	1,666	0,98
MIZRAHI&BERK	30	17	4,766	0,98	1,620	0,99
MIZRAHI&BERK	30	19	5,780	0,98	3,186	0,99
MIZRAHI&BERK	30	23	3,658	0,97	8,498	0,96
MIZRAHI&BERK	30	25	6,971	0,95	3,576	0,96
MIZRAHI&BERK	40	14	0,447	1,00	0,499	0,99
MIZRAHI&BERK	40	17	2,152	0,99	1,177	1,00
MIZRAHI&BERK	40	19	6,100	0,98	5,429	0,97
MIZRAHI&BERK	40	23	0,750	1,00	2,872	0,99
MIZRAHI&BERK	40	25	65,220	0,92	78,324	0,92
MIZRAHI&BERK	50	14	2,962	0,87	3,524	0,58
MIZRAHI&BERK	50	17	0,331	1,00	0,331	1,00
MIZRAHI&BERK	50	19	0,763	0,99	0,191	1,00
MIZRAHI&BERK	50	23	2,069	0,99	18,265	0,97
MIZRAHI&BERK	50	25	4,441	0,98	24,687	0,87
MIZRAHI&BERK	60	14	0,434	0,97	0,778	0,86
MIZRAHI&BERK	60	17	0,329	1,00	0,102	1,00
MIZRAHI&BERK	60	19	8,436	0,96	0,105	1,00
MIZRAHI&BERK	60	23	10,177	0,13	1,016	0,75
MIZRAHI&BERK	60	25	32,246	0,96	14,692	0,98
MIZRAHI&BERK	70	14	0,042	1,00	0,231	0,99
MIZRAHI&BERK	70	17	0,944	0,99	1,030	0,99
MIZRAHI&BERK	70	19	0,204	1,00	0,205	1,00
MIZRAHI&BERK	70	23	54,771	0,00	27,668	0,00
MIZRAHI&BERK	70	25	70,051	0,72	17,917	0,91
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	20	14	2,627	0,98	11,372	0,93
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	20	17	2,258	0,99	14,875	0,94
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	20	19	2,052	1,00	11,003	0,97
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	20	23	7,692	0,87	3,633	0,95
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	20	25	32,767	0,65	113,118	0,19
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	25	14	8,879	0,93	8,879	0,93
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	25	17	24,643	0,90	27,451	0,88
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	25	19	0,933	1,00	1,880	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	25	23	15,436	0,96	19,975	0,94
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	25	25	114,086	0,00	38,529	0,23
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	30	14	5,135	0,95	5,135	0,95
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	30	17	15,315	0,95	9,071	0,96
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	30	19	2,489	0,99	1,374	1,00
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	30	23	7,089	0,96	3,504	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	30	25	4,612	0,97	2,534	0,98

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			$\chi^2$	$R^2$	$\chi^2$	$R^2$
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	40	14	0,774	0,99	1,723	0,98
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	40	17	8,629	0,97	6,228	0,98
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	40	19	4,456	0,98	2,036	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	40	23	1,602	1,00	6,306	0,98
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	40	25	44,997	0,95	134,459	0,88
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	50	14	3,791	0,86	5,275	0,46
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	50	17	1,149	0,99	1,149	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	50	19	0,622	0,99	0,55	1,00
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	50	23	1,837	0,99	30,587	0,95
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	50	25	3,331	0,98	20,054	0,91
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	60	14	0,549	0,96	0,900	0,85
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	60	17	0,985	0,99	1,744	0,98
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	60	19	10,876	0,95	4,129	0,98
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	60	23	4,940	0,52	1,018	0,77
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	60	25	124,544	0,84	34,043	0,95
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	70	14	0,205	1,00	0,428	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	70	17	1,745	0,99	2,332	0,99
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	70	19	0,209	1,00	0,248	1,00
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	70	23	56,708	0,00	27,618	0,00
SCHULMANN-HAROSKE-REHER	70	25	23,990	0,90	21,036	0,90
WINDHAB	20	14	0,068	1,00	0,068	1,00
WINDHAB	20	17	0,889	1,00	0,458	1,00
WINDHAB	20	19	0,934	1,00	1,483	0,99
WINDHAB	20	23	13,144	0,96	16,897	0,95
WINDHAB	20	25	28,658	0,44	105,238	0,03
WINDHAB	25	14	0,068	1,00	0,068	1,00
WINDHAB	25	17	0,889	1,00	0,458	1,00
WINDHAB	25	19	0,934	1,00	1,483	0,99
WINDHAB	25	23	1,144	0,96	16,897	0,95
WINDHAB	25	25	27,472	0,60	34,271	0,26
WINDHAB	30	14	0,212	1,00	0,212	1,00
WINDHAB	30	17	2,304	0,99	1,875	0,99
WINDHAB	30	19	2,057	0,99	1,151	1,00
WINDHAB	30	23	3,349	0,98	1,236	1,00
WINDHAB	30	25	4,217	0,97	2,026	0,98
WINDHAB	40	14	0,293	1,00	0,590	0,99
WINDHAB	40	17	0,226	1,00	0,162	1,00
WINDHAB	40	19	1,860	0,99	0,971	1,00
WINDHAB	40	23	0,598	1,00	0,428	1,00
WINDHAB	40	25	27,822	0,97	26,883	0,97

**Tabela 3.** (Continuação....)

MODELO	TEMP. (°C)	CONC. (°BRIX)	IDA		VOLTA	
			$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
WINDHAB	50	14	2,203	0,91	0,758	0,90
WINDHAB	50	17	0,156	1,00	0,156	1,00
WINDHAB	50	19	0,560	0,99	0,137	1,00
WINDHAB	50	23	1,792	0,99	4,039	0,99
WINDHAB	50	25	2,957	0,99	14,640	0,93
WINDHAB	60	14	0,321	0,98	1,369	0,76
WINDHAB	60	17	0,095	1,00	0,071	1,00
WINDHAB	60	19	8,028	0,92	0,039	1,00
WINDHAB	60	23	4,940	0,27	1,018	0,59
WINDHAB	60	25	32,246	0,91	14,692	0,96
WINDHAB	70	14	0,042	1,00	0,231	0,98
WINDHAB	70	17	0,194	1,00	0,133	1,00
WINDHAB	70	19	0,204	1,00	0,205	1,00
WINDHAB	70	23	91,172	0,17	66,525	4,06
WINDHAB	70	25	23,990	0,82	21,036	0,81

O modelo de Windhab apresentou equivalente apenas nas seguintes condições: 1) temperatura de 20°C, concentração de 25°Brix → Modelo de Casson generalizado; 2) temperatura de 50°C, concentração de 19°Brix → Modelo de Herschel-Bulckley; 3) temperatura de 60°C, concentração de 23°Brix → Modelo de Schulmann-Haroske-Reher; 4) temperatura de 60°C, concentração de 25°Brix → Modelo de Mizrahi & Berk; 5) temperatura de 70°C, concentração de 14°Brix → Modelo de Mizrahi & Berk; 6) temperatura de 70°C, concentração de 19°Brix → Modelo de Mizrahi & Berk; 7) temperatura de 70°C, concentração de 23°Brix → Modelo de Casson; 8) temperatura de 70°C, concentração de 25°Brix → Modelo de Casson. Assim como o modelo de Windhab e considerando que normalmente R<sup>2</sup> deverá ser maior que 0,80, outros modelos utilizados também apresentaram coeficientes estatísticos aceitáveis para serem escolhidos como representativos do comportamento reológico da polpa de cupuaçu, se encaixariam nesta condição os modelos de Mizrahi & Berk, Herschel-Bulckley, Casson, Schulmann-Haroske-Reher apresentando coeficientes estatísticos representativos para as temperaturas de (30 e 40) °C e para todas as concentrações, tanto na ida quanto na volta, sendo que os modelos de Mizrahi & Berk, Herschel-Bulckley, Schulmann-Haroske-Reher também apresentaram bons coeficientes para a temperatura de 50°C e todas as concentrações, porém somente na ida. O modelo de Windhab, pode ser escolhido para descrever o comportamento reológico das amostras, pois apresentou coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) próximos a um(1) e coeficientes estatísticos ( $\chi^2$ ), próximos a zero (0). Assim como os modelos de Mizrahi & Berk, Herschel-Bulckley, Casson, Schulmann-Haroske-Reher. Cabral *et al.* (2002) também verificaram bons coeficientes estatísticos para polpa de cupuaçu peneirada ao analisar o modelo de Herschel-Bulckley.

Os dados dos parâmetros de controle de ajuste do modelo de Windhab encontram-se na Tabela 4.

Observou-se que, em vários momentos, houve diferença entre os parâmetros do modelo, quando houve aumento do cisalhamento, em relação a condição de diminuição do cisalhamento, o que caracteriza o comportamento tixotrópico da polpa de cupuaçu. Este comportamento será analisado posteriormente.

Os valores da tensão de cisalhamento inicial, ou residual ( $\tau_0$ ) variaram de zero -temperatura de 60°C, concentração de 19°Brix, na condição IDA, temperaturas de (20, 50 e 70)°C, nas concentrações de (23, 14 e 25)°Brix, respectivamente, para a condição VOLTA - até os valores máximos de 65 Pa, para a condição IDA, na temperatura de 70°C, concentração de 23°Brix e de 55 Pa, para a condição VOLTA, na temperatura de 20°C, concentração de 25°Brix.

O valor de  $\tau_0$  pode ser interpretado, como a tensão de cisalhamento necessário para o início do escoamento do fluido. A diferença nestes valores com a temperatura e com a concentração da polpa mostra, então, que a condição inicial para que a polpa comece a fluir, depende da temperatura e da concentração da polpa.

Encontrou-se na literatura, situações em que os valores de  $\tau_0$  negativos foram aceitos em modelos que empregam este parâmetro. Por exemplo, Cabral *et al.* (2002), encontraram valores negativos para  $\tau_0$  ao ajustar o modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de cupuaçu peneirada. Também Ferreira *et al.* (2008) encontraram valor de  $\tau_0$  negativo na aplicação do mesmo modelo a polpa de cupuaçu integral. Contudo, embora os softwares estatísticos aceitem o ajuste destes modelos, cabe ao pesquisador rejeitar modelos cujo significado físico seja equivocado ou vez que existem softwares que permitem o estabelecimento de faixas de valores para os parâmetros. Neste caso, valores negativos de  $\tau_0$  levam a interpretações absurdas dos resultados, tal como a possibilidade da polpa fluir por si só, ou de se ter que aplicar uma tensão no sentido contrário ao movimento da polpa, para acelerar a mesma. Sendo assim, no ajuste dos modelos, feito neste trabalho, limitamos os valores de  $\tau_0$  a números maiores ou iguais a zero em todos os ajustes.

**Tabela 4. Valores dos dados experimentais dos parâmetros do modelo de Windhab, para cada temperatura (TEMP) e teor de sólidos solúveis totais (SST), para as duas situações distintas: quando a tensão estava sendo aumentada (IDA) e quando da tensão estava sendo diminuída (VOLTA)**

TEMPERATURA, (°C)	CONC, (°Brix)	IDA				VOLTA			
		$\tau_0$ Pa	$\tau_1$ Pa	$\dot{\gamma}^*$ s <sup>-1</sup>	$n_a$ Pa,s	$\tau_0$ Pa	$\tau_1$ Pa	$\dot{\gamma}^*$ s <sup>-1</sup>	$n_a$ Pa,s
20	14	24,5±0,3	80,0±2,8	11,3±0,6	0,069±0,009	31,1±0,7	90,0±3,0	7,3±0,4	0,350±0,090
	17	27,2±0,7	78,0±1,6	9,2±0,8	0,075±0,004	27,8±0,9	100,0±3,0	10,2±0,6	0,030±0,010
	19	30,8±0,6	186,0±4,1	10,3±0,5	0,001*	6,0±1,0	64,0±2,0	6,0±1,0	0,770±0,030
	23	31,0±2,1	81,0±1,3	7,0±0,7	0,001*	0*	40,0±1,0	1,2±0,2	2,130±0,090
	25	57,0±4,9	104,0±21	0,3±0,3	0,400*	55,0±6,0	90,0*	2,5*	0,130±0,080
25	14	9,4±0,3	68,0±1,0	90,0±2,2	0,017±0,003	9,4±0,3	68,0±1,0	90,0±2,2	0,017±0,003
	17	28,0±1,1	108,0±4,8	166,0±13,0	0,001±0,007	26,0±0,9	97,0±2,0	113,0±5,0	0,021±0,003
	19	18,0±2,6	55,0±7,4	24,0±6,8	0,610±0,080	22,0±3,0	64,0±17,0	31,0±15,0	0,500±0,200
	23	20,0±2,7	150,0±6,0	47,0±3,8	0,400±0,200	19,0±4,0	197,0±12,0	53,0±23,0	0,001*
	25	43,0±6,6	74,0±6,0	0,6±0,5	0,001*	50,0±5,0	74,0±9,0	2,4±0,2	0,001*
30	14	14,1±0,4	68,0±4,6	136,0±12,0	0,004±0,001	14,1±0,4	68,0±4,6	136,0±12,0	0,004±0,001
	17	27,0±1,7	107,0±14,2	193,0±37,0	0,001*	21,0±2,0	68,0±3,0	90,0±11,0	0,072±0,005
	19	24,0±1,9	50,0±6,6	26,0±9,5	0,600±0,060	20,0±1,0	50,0±6,0	28,0±8,0	0,610±0,060
	23	28,0±1,1	120,0±13,2	27,0±36	0,100±0,020	35,0±0,9	141,0±5,0	38,0±3,0	0,001*
	25	32,0±3,2	226,0±29	37,0±4,0	0,001*	40,0±2,0	143,0±21,0	19,0±6,0	0,001*
40	14	17,9±0,6	48,0±2,8	88,0±10,0	0,065±0,008	19,0±1,0	45,0±2,0	34,0±5,0	0,127±0,009
	17	21,6±0,7	97,0±5,8	158,0±13,0	0,030±0,010	17,8±0,6	78,0±3,0	114,0±6,0	0,069±0,006
	19	23,0±1,4	130,0±15	92,0±9,0	0,050±0,040	28,0±1,0	130,0±15,0	98,0±10,0	0,100±0,060
	23	34,0±1,9	158,0±8,1	119,0±5,9	0,060±0,040	26,0±2,0	160,0±41,0		
	25	37,0±1,8	105,0±24	23,0±2,7	0,500±0,300	28,0±2,0	140,0±2,0	93,0±20,0	0,005±0,001
							19,0±1,0	0,001*	

\* o valor do parâmetro foi mantido constante, para ajuste do modelo, não havendo, portanto, estimativa para o erro

**Tabela 4.** (Continuação...)

TEMPERATURA, (°C)	CONC, (°Brix)	IDA				VOLTA			
		$\tau_0$ Pa	$\tau_1$ Pa	$\dot{\gamma}^*$ s <sup>-1</sup>	$n_a$ Pa,s	$\tau_0$ Pa	$\tau_1$ Pa	$\dot{\gamma}^*$ s <sup>-1</sup>	$n_a$ Pa,s
50	14	16,0±1,6	42,0±1,3	152,0±26,0	0,001*	0*	36,2±0,2	18,0±1,0	0,01*
	17	13,9±0,5	49,0±2,5	149,0±14,0	0,0370±0,004	13,9±0,5	49,0±2,5	149,0±14,0	0,0370±0,004
	19	30,0±1,3	126,0±11	126,0±22,0	0,001*	24,4±0,9	132,0±8,0	134,0±17,0	0,001*
	23	28,0±7,7	54,0±2,0	38,0±4,2	0,4±0,14	22,0±3,0	117,0±8,0	88,0±11,0	0,100±0,020
	25	39,0±2,2	85,0±2,2	18,0±8,7	0,6±0,35	35,0±16,0	43,0±5,0	3,0±1,0	1,700±0,200
60	14	5,0±2,2	18,0±1,2	69,0±15,0	0,019±0,003	0*	16,0±1,0	1,0*	0,033±0,004
	17	11,7±1,1	48,0±2,6	136,0±12,0	0,036±0,005	9,3±0,4	37,0±2,0	112,0±9,0	0,059±0,004
	19	0*	89,0±2,6	143,0±43,0	0,07±0,05	17,0±1,0	109,0±31,0	293,0±82,0	0,040±0,030
	23	31,0*	78,0±0,6	40,0*	0,001*	9,0±7,0	52,0±1,0	40,0*	0,001*
	25	35,0±2,1	128,0±4,1	21,0*	0,001*	30,8±0,8	101,0±8,0	21,0±3,0	0,300±0,090
70	14	4,9±0,5	23,0±1,0	87,0±9,1	0,040±0,003	7,3±0,4	45,2±0,6	228,0±10,0	0,001*
	17	14,7±0,6	64,0±3,4	162,0±13,0	0,031±0,006	11,1±0,5	58,0±2,0	131,0±8,0	0,042±0,004
	19	14,4±0,7	55,0±4,0	130,0±16,0	0,093±0,008	10,3±0,4	55,0±4,0	154,0±13,0	0,097±0,003
	23	65,0±8,1	11,0±9,4	10,0±1,6	2,0±0,3	48,0±8,0	37,0±14,0	4,0±1,0	0,200±0,070
	25	33,0*	35,0±1,9	1,0*	1,67±0,08	0*	38,0±2,0	1,0*	1,770±0,070

- o valor do parâmetro foi mantido constante, para ajuste do modelo, não havendo, portanto, estimativa para o erro

De forma análoga  $\tau_0$ , o parâmetro  $n_a$  também tem significado físico, representando o valor de viscosidade final do fluido, quando atingida a condição de equilíbrio. De forma a manter a coerência do modelo o valor mínimo estabelecido para  $n_a$  foi de 0,001 Pa.s que representa a viscosidade da água na faixa de temperaturas estudadas. Admitir valores de  $n_a$  menores que o dá água também não teria sentido físico, porque a polpa é constituída principalmente de água.

Uma análise dos valores de  $\tau_0$  em função da temperatura e dos sólidos solúveis totais, da polpa de cupuaçu, expressos em graus Brix, mostrou que, em cada temperatura, houve pelo menos um valor de sólidos solúveis totais, para o qual  $\tau_0$  na condição IDA foi diferente que na condição VOLTA. Permitindo considerar que o modelo obtido, em si, será diferente, em termos de valores dos parâmetros, de uma condição para a outra, caracterizando a tixotropia da polpa.

Como as diferenças entre os valores dos parâmetros, entre a condição IDA e a condição VOLTA, são pontuais, e como o comportamento geral dos mesmos é muito similar, foi feita uma análise geral deste comportamento, para cada parâmetro do modelo.

Uma análise do comportamento geral dos valores de  $\tau_0$ , em função da temperatura e dos sólidos solúveis totais, expressos em graus Brix, levou a um ajuste de modelos lineares, correlacionando o valor de  $\tau_0$  com os sólidos solúveis totais, em cada temperatura. A Tabela 5 mostra os valores dos parâmetros, para cada temperatura, bem como os respectivos coeficientes de determinação de valores da estatística  $\chi^2$ .

O menor valor de coeficiente de determinação encontrado foi de 0,79 e o maior de 0,95. Observou-se que o valor do parâmetro tensão inicial, do modelo de Windhab, tende a aumentar com o aumento da concentração da polpa. Também se observou, pelos coeficientes angulares das equações de regressão linear (Tabela 5) que este aumento foi mais acentuado, com o aumento da temperatura, que a tensão tende a diminuir com o aumento da temperatura. A Figura 10 exemplifica este comportamento de  $\tau_0$  para as temperaturas de 20 e 70 °C.

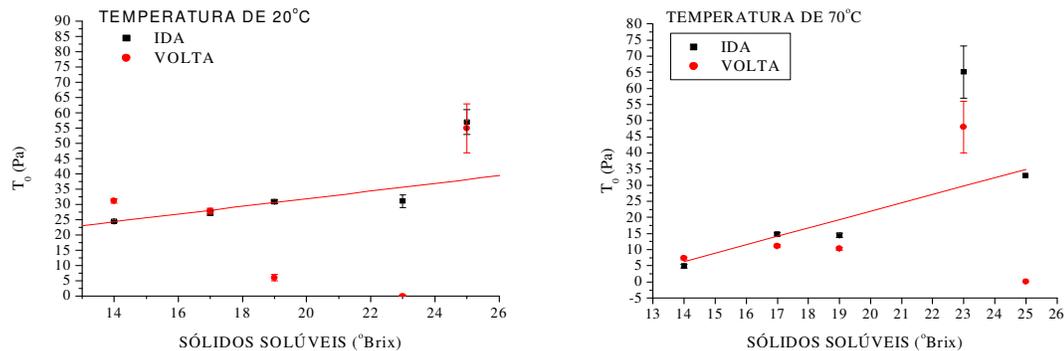
O comportamento de  $\tau_0$  obtido no presente trabalho também foi observado por alguns autores, no que se diz a variação da tensão inicial com a temperatura, havendo uma diminuição da  $\tau_0$  com o aumento da temperatura, devendo-se este comportamento a alguns fatores como a produção de debilitamento da rede tridimensional de gel formado pelas pectinas, podendo formar o efeito tixotrópico em marmeladas (VILLARÁN, 1997); heterogeneidade do suco de frutas de *Juniperus drupácea* concentrado por ebulição e não uniformização da distribuição das partículas (AKBULUT et al.,2008); enfraquecimento da estrutura do material de recheios de frutas para bombons, sendo maior para partículas maiores (MIQUELIM, 2006); já FERREIRA et al. (2008), determinaram o efeito da temperatura e taxa de cisalhamento da polpa de cupuaçu integral, na faixa de temperatura de 10 a

60°C, e ao descrever os reogramas pelos modelos de Ostwald-de-Waelle e o de Herschel-Bulkley, observaram que o modelo de Herschel-Bulkley apesar de ajustar bem aos dados experimentais apresentou valor de tensão inicial negativo e consideraram sem significado físico.

**Tabela 5. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro  $\tau_0$  da equação de Windhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\tau_0=A+Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura °C	A	B	$R^2$
20	0,1±0,5	1,4±0,3	0,90
25	-20,0±1,5	2,3±0,8	0,79
30	-13,0±3,0	1,9±0,2	0,96
40	-2,2±0,5	1,4±0,3	0,83
50	-24,0±1,0	2,3±0,5	0,85
60	-34,0±1,3	2,5±0,6	0,80
70	-30,0±2,3	2,6±0,5	0,79

Concomitantemente no que se diz ao comportamento de  $\tau_0$  com a concentração de sólidos solúveis, alguns autores como Branco *et al.* (2005), Sato (2005), Costell *et al.*(1982), Ahmed *et al.* (2007), Wallevik (2009) observaram nos seus trabalhos um aumento de  $\tau_0$  com o aumento da concentração de sólidos solúveis e relacionou este comportamento à interação entre as partículas, que quanto maior a concentração de sólidos maior será a interação entre as partículas entre os constituintes sólidos do alimento exigindo uma maior tensão residual. A figura 10 mostra o comportamento de  $\tau_0$  e função dos sólidos solúveis para as temperaturas de 20°C e 70°C.



**Figura 10. Comportamento de  $\tau_0$ , do modelo de Windhab, em função dos sólidos solúveis totais, expressos em graus Brix, para a polpa de cupuaçu para as temperaturas e (20 de 70)°C**

É possível observar o aumento da tensão residual com o aumento do teor de sólidos solúveis para a polpa de cupuaçu e que para a temperatura de 70°C a tensão residual diminui em relação a temperatura de 20°C.

Uma análise de regressão linear múltipla, associando os valores de temperatura e sólidos solúveis totais com a tensão residual do modelo de Windhab, mostrou um coeficiente de correlação de 0,89. Também se encontrou que tanto a temperatura como os sólidos solúveis contribuem na predição de  $\tau_0$  ( $P < 0,05$ ). A equação obtida nesta análise foi:

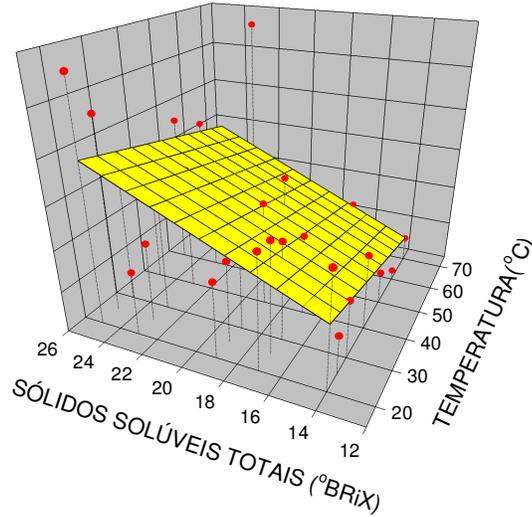
$$\tau_0 = -9,216 - 0,193T + 2,069SST \quad (22)$$

Sendo:  $\tau_0$  = Parâmetro tensão residual do modelo de Windhab (Pa)

T = Temperatura (°C)

SST= Sólidos solúveis totais (°Brix)

Este resultado mostra que o parâmetro  $\tau_0$  depende mais da concentração da polpa que da temperatura, embora dependa de ambas. A Superfície da resposta, construída a partir da equação de regressão linear múltipla, bem como os dados originais, são mostrados na Figura 11.



**Figura 11. Superfície de resposta, obtida a partir da regressão linear múltipla, relacionando temperatura e sólidos solúveis totais, com o parâmetro  $\tau_0$  do modelo reológico de Windhab, ajustado para a polpa de cupuaçu.**

Os valores de  $\tau_1$ , variaram de 4,9 Pa (na temperatura de 70°C, concentração de 14 °Brix) até 226 Pa (na temperatura de 30°C, concentração de 25 °Brix) para a condição IDA e de 16 Pa (na temperatura de 60°C, concentração de 14 °Brix) até 197 Pa (na temperatura de 25°C, concentração de 23 °Brix) para a condição VOLTA.

O valor de  $\tau_1$  representa a tensão na qual o fluido atingiu a completa estruturação. Portanto, os diferentes valores de  $\tau_1$  obtidos mostram que a condição de estruturação do fluido, para a polpa de cupuaçu, depende da temperatura e da concentração, bem como do comportamento tixotrópico da polpa.

Os resultados da análise de regressão, associando  $\tau_1$  com os sólidos solúveis totais, para cada temperatura, indicaram que não houve efeito linear da variação de  $\tau_1$  com a concentração para as temperaturas de 20, 25 e 30 °C. Contudo, a partir da temperatura de 40°C, inclusive, passou-se a observar o efeito linear dos SST. Os parâmetros obtidos nestas equações de regressão, com os respectivos coeficientes de determinação, são mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro  $\tau_1$  da equação de Windhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\tau_1 = A+Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura (°C)	A	B	$R^2$
40	-116,0±3,0	12,0±2,0	0,93
50	1,0±0,2	3,0±0,1	0,75
60	-69,0±3,0	6,0±0,1	0,88
70	-8,0± 1,0	1,3±0,1	0,65

Para as temperaturas de (20, 25 e 30)°C, nas quais  $\tau_1$  não se detectou variação do valor de  $\tau_1$  com a concentração, os valores médios de  $\tau_1$  foram - 93±3,0, 99±3,5, 108±4,4, respectivamente.

As diferenças em  $\tau_1$  foram também identificadas por alguns autores que observaram uma diminuição de  $\tau_1$  com o aumento da temperatura e relacionaram a fatores como aquecimento que sofrem, por exemplo, extrato de Roselle concentrado de (5-65)%, uma vez que a viscosidade de uma solução é uma função das forças intermoleculares e interação água-soluto, este restringindo o movimento molecular quando a solução é aquecida a viscosidade diminui devido o aumento da energia térmica das moléculas, aumentando a distância inter-molecular devido a expansão térmica (HASSAN *et al.*, 1998); o amolecimento de chocolate ou de queijo quando aquecidos, devido à fusão de gordura, geleificação para formar géis de pectina, espessamento de soluções de amido gelatinizado e endurecimento da carne e produtos de ovos causado pela desnaturação protéica (STEFFE, 1996); diminuição da viscosidade de polpa de manga centrifugada na faixa de temperatura de (10-60)°C na fase líquida, aumentando a mobilidade das partículas em suspensão, já que a maioria das polpas de frutas apresentam-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos (VIDAL *et al.*, 2006); de formação de histerese nas temperaturas de (5 e 85)°C na polpa de jabuticaba apresentando comportamento tixotrópico percebendo-se que com o aumento da tensão houve a diminuição da viscosidade, característica de comportamento pseudoplástico, além de que a histerese entre as curvas tende a ser menor com o aumento da temperatura. Importando ressaltar que a altas tensões o aumento da temperatura influencia mais significativamente na redução da viscosidade aparente do que a baixas tensões (SATO *et al.*, 2007). Além de outros autores que também identificaram este comportamento como PEREIRA *et al.* (2003), ao estudar o comportamento reológico de mel de abelha urucu; FERREIRA *et al.* (2008) ao estudar o comportamento reológico da polpa de cupuaçu integral, na faixa de temperatura de 10 a 60°C; NINDO *et al.* (2007), HARNANAN *et al.* (2001); FERREIRA *et al.* (2003), ao estudarem as propriedades reológicas do purê de mirtilo e polpa de goiaba e HAMINIUK *et*

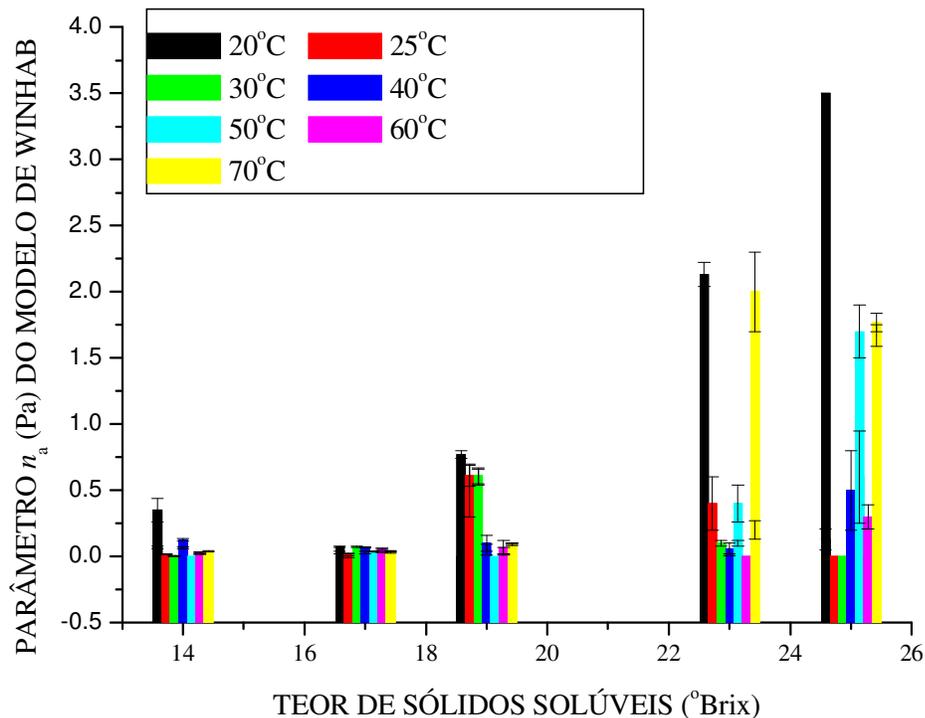
*al.* (2006) ao estudar a influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de araçá boi integral.

Importando ressaltar também o trabalho realizado por LANNES *et al.* (2002), ao estudar reologicamente formulações líquidas de chocolate de cupuaçu utilizando sensores Vane e cilindros concêntricos para análises reológicas, observou diferença significativa para tensão de cisalhamento determinada com o cilindro concêntrico podendo ser devido a sua geometria causar grande agitação durante a análise, cuja tensão é maior quando comparada ao de Vane.

O parâmetro  $n_a$  variou de 0,001Pa.s - na temperatura de 20°C, concentrações de (19 e 23) °Brix, na temperatura de 20°C, concentrações de (17 e 25)°Brix, na temperatura de 25°C, concentrações de (17 e 25)°Brix na temperatura de 30°C, concentrações de (17 e 25)°Brix na temperatura de 50°C, concentrações de (14 e 19)°Brix e na temperatura de 60°C, concentrações de (23 e 25)°Brix a 2,0 Pa.s - na temperatura de 70°C, concentração de 23°Brix - para a condição IDA. Para a condição VOLTA, este parâmetro variou de 0,001 Pa.s - na temperatura de 25°C, concentrações de (23 e 25)°Brix, na temperatura de 30°C, concentrações de (23 e 25)°Brix, na temperatura de 40°C, concentração de 25°Brix, na temperatura de 50°C, concentração de 19°Brix, na temperatura de 60°C, concentração de 23°Brix e na temperatura de 70°C, concentração de 14°Brix a 1,77 Pa.s ( na temperatura de 70°C, SST de 25°Brix).

A análise de regressão linear, aplicada para verificar a variação de  $n_a$  com os SST, para cada temperatura, não levou a bons coeficientes de correlação, sendo o melhor dele de 0,62, para a temperatura de 70°C. O modelo polinomial de segundo grau, também foi testado, identicamente levando a coeficientes de determinação muito ruins, sendo o melhor dele de 0,57 para a temperatura de 70°C. Houve, portanto, possibilidade de modelar o comportamento da variável  $n_a$ .

A Figura 12 mostra a variação  $n_a$  de acordo com a concentração, para cada uma das temperaturas utilizadas neste experimento. Embora não se tenha encontrado um modelo para descrever o comportamento deste parâmetro, observou-se que o mesmo seus valores, e sua variabilidade, com o aumento dos SST. Também se observou que na temperatura de 20°C este parâmetro apresentou seus maiores valores, em todos os casos.



**Figura 12. Variação do parâmetro  $n_a$  do modelo de Winhab com a temperatura e com os sólidos solúveis totais (SST), expressos em graus brix, para a polpa de cupuaçu.**

O parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  apresentou valores mínimo de  $0,3 \text{ s}^{-1}$  na temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , concentração de  $25^\circ\text{Brix}$  e máximo de  $193 \text{ s}^{-1}$  para a temperatura de  $30^\circ\text{C}$ , concentração de  $17^\circ\text{Brix}$ , para a condição IDA. Na condição VOLTA, este parâmetro apresentou valor mínimo de  $1 \text{ s}^{-1}$  para as temperaturas de  $(60 \text{ e } 70)^\circ\text{C}$ , nas concentrações de  $(14 \text{ e } 25)^\circ\text{Brix}$ , respectivamente e valor máximo de  $293$ , na temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , concentração de  $19^\circ\text{Brix}$ .

Os valores dos coeficientes da análise de regressão linear, correlacionado os valores do parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  com os SST, para cada temperatura, estão na Tabela 7. Esta análise mostrou que ocorreu um decréscimo, deste parâmetro com o aumento dos SST, para cada temperatura estudada. Este parâmetro, fisicamente, corresponde à taxa de cisalhamento, para a qual se atingiu  $63,2\%$  da estruturação do fluido. Portanto, a sua diminuição, com o aumento dos SST, indica que, quanto mais concentrada a polpa, mais rapidamente ela atingirá o equilíbrio.

**Tabela 7. Valores dos parâmetros do modelo linear, correlacionando o parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  da equação de Windhab, com os sólidos solúveis totais, expressos em graus brix ( $\dot{\gamma}^* = A+Bx$ ), para cada temperatura em que o modelo foi ajustado, com os respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura (°C)	A	B	$R^2$
20	23,0±3,0	-0,7±0,1	0,90
25	236,0±62,0	-9,0±0,3	0,79
30	291,0±68,0	-11,0±3,0	0,79
40	152,0±72,0	-3,5±0,2	0,79
50	253,0±86,0	-8,0±0,4	0,81
60	186,0±14,0	-5,0±3,0	0,78
70	417,0±70,0	-16,0±4,0	0,84

Uma análise de regressão linear múltipla, associando os valores de temperatura e sólidos solúveis totais com os valores obtidos do parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  do modelo de Windhab, mostrou um coeficiente de correlação de 0,89. Também se encontrou que tanto a temperatura como os sólidos solúveis contribuem na predição de  $\dot{\gamma}^*$  ( $P < 0.05$ ). A equação obtida nesta análise foi:

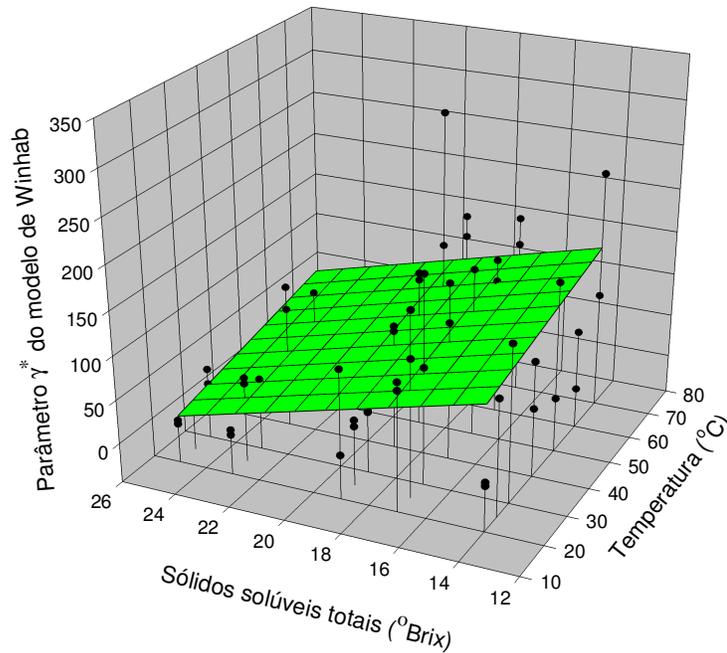
$$\dot{\gamma}^* = 192 + 0,9T - 8SST \quad (23)$$

Sendo:  $\dot{\gamma}^*$  = Taxa de deformação a 63,2% daquela em que a estrutura está definida, para a polpa de cupuaçu ( $s^{-1}$ )

T = Temperatura (°C)

SST = Sólidos solúveis totais (°Brix)

Este resultado mostra que o parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  de forma análoga ao parâmetro  $\tau_0$  depende mais da concentração da polpa que da temperatura, embora dependa de ambas. A Superfície da resposta, construída a partir da equação de regressão linear múltipla, bem como os dados originais, são mostrados na Figura 13.



**Figura 13. Superfície de resposta, obtida a partir da regressão linear múltipla, relacionando temperatura e sólidos solúveis totais com o parâmetro  $\dot{\gamma}^*$  do modelo reológico de Windhab, ajustado para a polpa de cupuaçu.**

## 4.2 Propriedades físicas

### 4.2.1 Atividade de água

A atividade de água é definida por Bobbio e Bobbio (2001), como o teor de água livre disponível nos alimentos que permite o crescimento de microrganismos e reações químicas, está ligada fracamente ao substrato, é dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento, e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura. O valor de atividade de água varia de 0 a 1.

Como era esperada, a concentração da polpa levou a diminuição de sua atividade de água. A Tabela 8 mostra os valores médios obtidos, com o respectivos desvios médios, da atividade de água, em função dos SST, para a polpa de cupuaçu, na temperatura de 25°C.

**Tabela 8. Valores médios, com os respectivos desvios médios, da atividade de água, em função dos SST, para a polpa de cupuaçu, na temperatura de 25°C.**

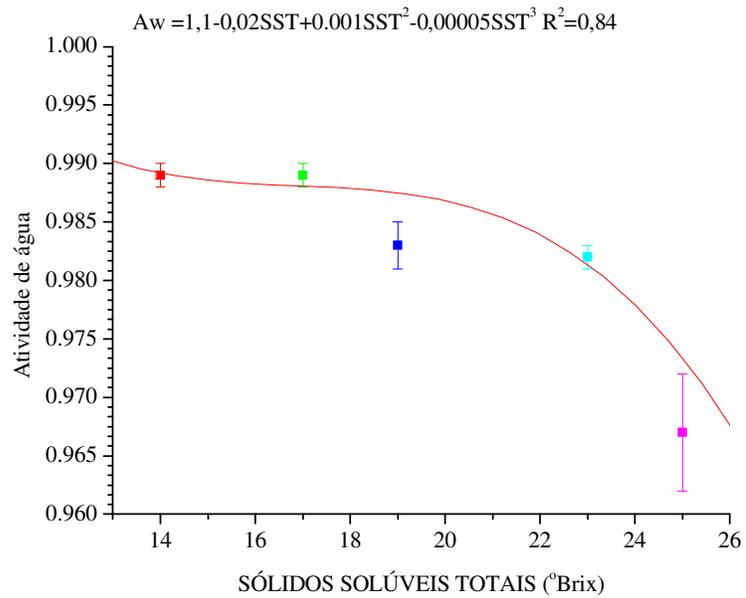
SST (°Brix)	Aw	Desvio médio
14	0,989	0,001
17	0,989	0,001
19	0,983	0,002
23	0,982	0,001
25	0,967	0,005

A análise de regressão polinomial levou a um modelo cúbico, para descrever a diminuição da atividade de água da polpa em função dos SST da mesma. A Tabela 9 mostra os parâmetros do modelo e a Figura 14 mostra o ajuste da curva. O coeficiente de determinação obtido foi de 0,84. Embora seja um ajuste puramente estatístico e deva, portanto, ser aplicado apenas a situação específica.

**Tabela 9. Valores dos parâmetros e do erro do modelo polinomial cúbico**

( $Aw = A + B * SST + C * SST^2 + D * SST^3$ ), correlacionando o da atividade de água da polpa de cupuaçu, a 25°C, com os sólidos solúveis totais SST.

Parâmetro	Valor	Erro
A	1,1	±0,5
B	-0,02	±0,07
C	0,001	±0,004
D	-0,00003	±0,00007



**Figura 14. Ajuste polinomial cúbico, para a atividade de água ( $A_w$ ) em função dos sólidos solúveis totais (SST) para a polpa de cupuaçu.**

#### 4.2.2 Propriedades Termofísicas

Na Tabela 10 encontram-se os valores de condutividade elétrica, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico volumétrico e massa específica, para a polpa de cupuaçu, em função da temperatura e dos SST.

**Tabela 10. Valores de condutividade elétrica, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e da massa específica para a polpa de cupuaçu, em função da temperatura e dos sólidos solúveis totais (SST).**

Temperatura (°C)	SST (°Brix)	Condutividade e Elétrica (S/m)	Condutividade e Térmica (W/m <sup>2</sup> .K)	Difusividade Térmica (mm <sup>2</sup> /s)	Calor Específico Volumétrico (10 <sup>3</sup> J/kg.K)	Massa específica (g/m <sup>3</sup> )
20	14	6,38±0,09	0,59±0,02	0,141±0,001	4,17±0,14	1040,9±12,2 4
	17	6,07±0,17	0,52±0,02	0,134±0,001	3,88±0,09	1070,3±49,3 4
	19	4,29±0,03	0,53±0,01	0,137±0,001	3,88±0,03	1083,6±1,44
	23	6,23±0,08	0,51±0,02	0,135±0,001	3,59±0,17	1083,4±4,84
	25	6,08±0,09	0,47±0,01	0,132±0,002	3,67±0,07	1108,9±3,08
25	14	6,48±0,12	0,56±0,03	0,139±0,001	3,94±0,26	1041,2±12,7 3
	17	6,18±0,49	0,50±0,02	0,1372±0,004	3,67±0,12	1068,1±48,4 8
	19	4,49±0,35	0,54±0,01	0,138±0,001	3,95±0,07	1082,1±1,22
	23	6,99±0,30	0,54±0,02	0,135±0,002	3,86±0,06	1080,5±4,22
	25	6,38±0,10	0,48±0,02	0,134±0,002	3,74±0,08	1107,9±3,21
30	14	6,7±0,23	0,57±0,04	0,141±0,002	4,0±0,22	1041,7±12,8 3
	17	6,2±0,50	0,52±0,02	0,139±0,001	3,71±0,16	1084,7±14,3 3
	19	4,22±0,07	0,55±0,02	0,139±0,001	3,94±0,12	1082,0±2,12
	23	6,64±0,36	0,53±0,01	0,138±0,001	3,85±0,08	1077,8±4,93
	25	6,57±0,08	0,53±0,01	0,135±0,001	3,98±0,09	1106,4±3,26
40	14	6,92±0,21	0,57±0,04	0,144±0,003	3,92±0,19	1036,9±13,9 6
	17	6,68±0,15	0,51±0,01	0,139±0,001	3,69±0,09	1067,2±3,57
	19	5,07±0,34	0,51±0,02	0,146±0,003	3,44±0,14	1080,3±3,16
	23	6,71±0,15	0,49±0,01	0,137±0,001	3,6±0,03	1077,7±5,21
	25	6,66±0,09	0,53±0,06	0,135±0,002	3,78±0,29	1103,4±2,83
50	14	7,1±0,10	0,59±0,01	0,150±0,001	3,94±0,08	1033,9±14,8 4
	17	7,11±0,46	0,55±0,01	0,440±0,001	3,78±0,01	1065,2±2,78
	19	4,59±0,21	0,53±0,01	0,460±0,003	3,6±0,04	1077,0±1,38
	23	6,76±0,86	0,53±0,01	0,440±0,003	3,68±0,03	1076,8±6,55
	25	7,64±0,19	0,53±0,02	0,410±0,003	3,85±0,17	1101,8±3,59
60	14	7,42±0,35	0,56±0,01	0,520±0,001	3,68±0,09	1032,4±12,1 9
	17	7,47±0,56	0,54±0,01	0,460±0,001	3,75±0,02	1063,1±3,64
	19	7,2±1,37	0,52±0	0,460±0,002	3,54±0,05	1075,7±4,14
	23	7,36±0,96	0,59±0,03	0,560±0,009	3,79±0,14	1070,5±4,75
	25	8,05±0,47	0,57±0,04	0,370±0,001	3,96±0,31	1100,7±4,26
70	14	6,96±0,21	0,7±0,08	0,690±0,005	4,12±0,39	1032,4±14,1

					9
17	8,5±0,08	0,56±0,01	0,480±0,001	3,77±0,02	1061,4±2,2
19	7,49±0,74	0,55±0,01	0,580±0,002	3,45±0,02	1077,2±6,8
23	7,31±0,36	0,59±0,01	0,540±0,004	3,88±0,05	1062,0±7,91
25	8,06±0,45	0,68±0,05	0,144±0,002	4,47±0,08	1098,5±3,2

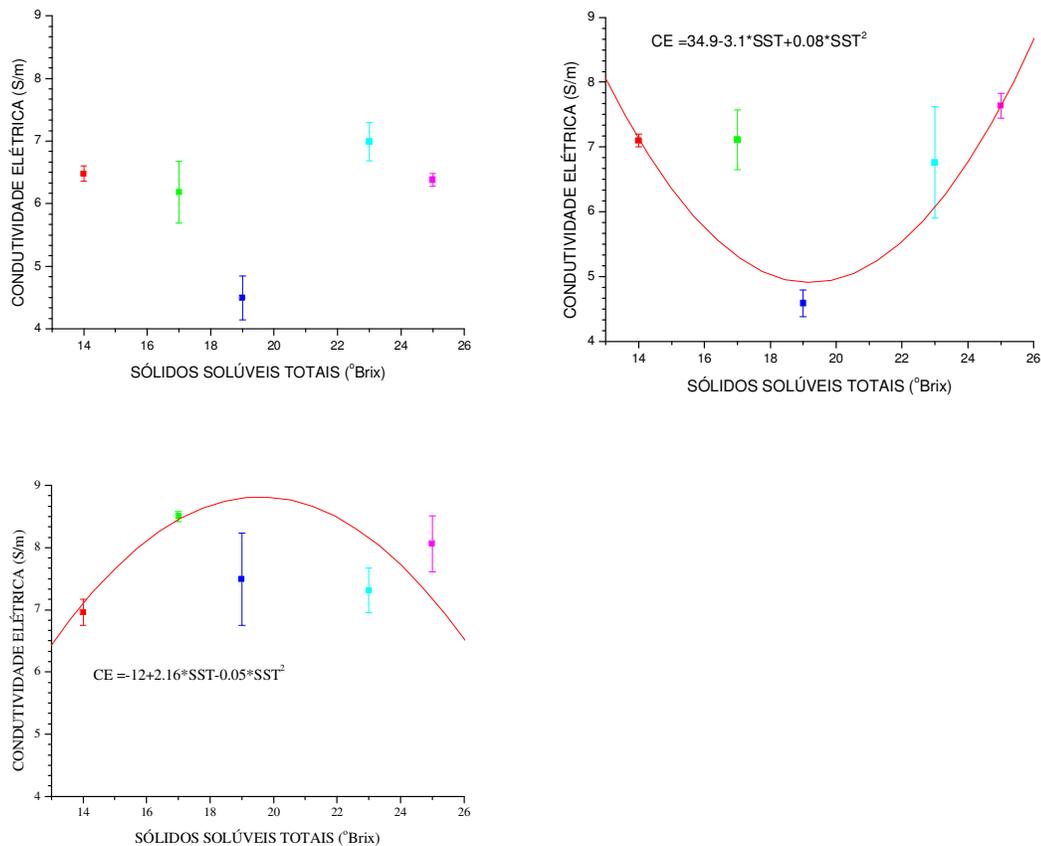
O valor mínimo de condutividade elétrica foi de 6,38 S/m, na temperatura de 20°C e 19°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 8,50 S/m, na temperatura de 70°C e 17 °Brix de sólidos solúveis totais. Esta variável apresentou erros na faixa de 0,03 a 1,37 S/m.

A análise de regressão polinomial, levou a um modelo quadrático, relacionando a condutividade elétrica com os SST, em cada temperatura. A Tabela 11 mostra os valores dos parâmetros obtidos, para este modelo, bem como os respectivos coeficientes de determinação.

**Tabela 11. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a condutividade elétrica (CE) em S/m com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $CE = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>)**

Temperatura (°C)	A	B	C	R <sup>2</sup>
20	30,0±1,0	-2,7±0,1	0,07±0,02	0,80
25	17,0±11	-1,1±1,2	0,02±0,03	0,31
30	34,6±7,6	-3,1±0,7	0,07±0,01	0,95
40	12,0±8,0	-0,5±0,8	0,01±0,02	0,19
50	34,9±7,8	-3,1±0,9	0,08±0,02	0,87
60	10,4±2,7	-0,3±0,2	0,01±0,00	0,84
70	-12,0±8,0	2,1±0,8	-0,01±0,02	0,79

Observou-se que três situações diferenciadas: nas temperaturas de (25 e 40)°C, o modelo apresentou coeficiente de determinação muito baixo. Nestas temperaturas, portanto, pode-se considerar o modelo não descreve bem o comportamento dos dados. Este comportamento foi verificado também por DINIZ *et al.* (2003) ao avaliar polpas de acerola nas temperaturas de (25, 30, 40, 50 e 60)°C que concluiu que o estudo das amostras na faixa de temperatura de (25 a 60)°C não resultou em variações de condutividade elétrica que pudessem ser atribuídas às condições térmicas. Nas demais temperaturas, houve uma tendência geral para diminuição da condutividade elétrica até a concentração de 19°Brix, seguida de um aumento, a exceção da temperatura de 70°C onde houve um aumento da condutividade elétrica, até 19°Brix, seguida de uma diminuição. A Figura 15 mostra exemplos destas três situações.



**Figura 15. Relações entre condutividade elétrica (CE) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu.**

Esse comportamento de aumento da condutividade com o aumento da temperatura foi verificado por CASTRO *et al.* (2002), ao estudar a influência do conteúdo de sólidos solúveis em produtos de morango; SARANG *et al.* (2008), avaliou a condutividade elétrica de 6 diferentes tipos de frutas (maçã vermelha, maçã dourada, pêra, ervilha, pepino e morando) sob diferentes temperatura desde a ambiente até temperatura de esterilização até 140°C. Em todos os casos a condutividade aumentou linearmente com a temperatura.

Quanto ao comportamento da condutividade elétrica com o teor de sólidos CASTRO *et al.* (2002), ao estudar a influência do conteúdo de sólidos solúveis verificou o aumento da condutividade elétrica com a diminuição do teor de sólidos solúveis, relacionando este acontecimento ao aumento da resistência para movimentação iônica; já MOURA (1998), ao estudar a condutividade elétrica de sucos concentrados de frutas tropicais (tangerina, abacaxi e limão), verificou para os três sucos a condutividade elétrica aumentou com a concentração de sólidos solúveis até 30°Brix e após este valor diminuiu com o aumento do teor de sólidos solúveis totais. A razão pode estar relacionada ao aumento da viscosidade dos sucos, dificultando assim a mobilidade dos íons que regem a condutividade elétrica

e esta aumenta com o aumento da temperatura e o seu efeito é mais pronunciado a maiores concentrações. Quanto maior a condutividade, mais rápido acontece o aquecimento, pois a taxa de transferência de calor é proporcional a condutividade elétrica. Adicionalmente DINIZ *et al.* (2003) trabalhando com polpas concentradas de acerola, em concentrações que variaram de 8°Brix a 22°Brix e temperaturas de (25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 50°C e 60)°C verificou um aumento de condutividade elétrica com o aumento de concentração.

O valor mínimo de condutividade térmica foi de 0,47 W/m<sup>2</sup>.K, na temperatura de 20°C e 25°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 0,70 W/m<sup>2</sup>.K, na temperatura de 70°C e 14°Brix de sólidos solúveis totais. Esta variável apresentou erros na faixa de 0,004 a 0,08 W/m<sup>2</sup>.K. Estes valores de condutividade se aproximam dos apresentados por diversos autores para suco de laranja (OLIVEIRA *et al.*, 2001), polpa de umbu (LIMA *et al.*, 2003), polpa de cupuaçu (ARAÚJO *et al.*, 2004), polpa de bacuri (MUNIZ *et al.*, 2006), suco de amora (CABRAL *et al.*, 2007), purê de cenoura (MARIANI *et al.*, 2009) e sucos de uva, pepino e laranja (MURAMATSU *et al.*, 2010).

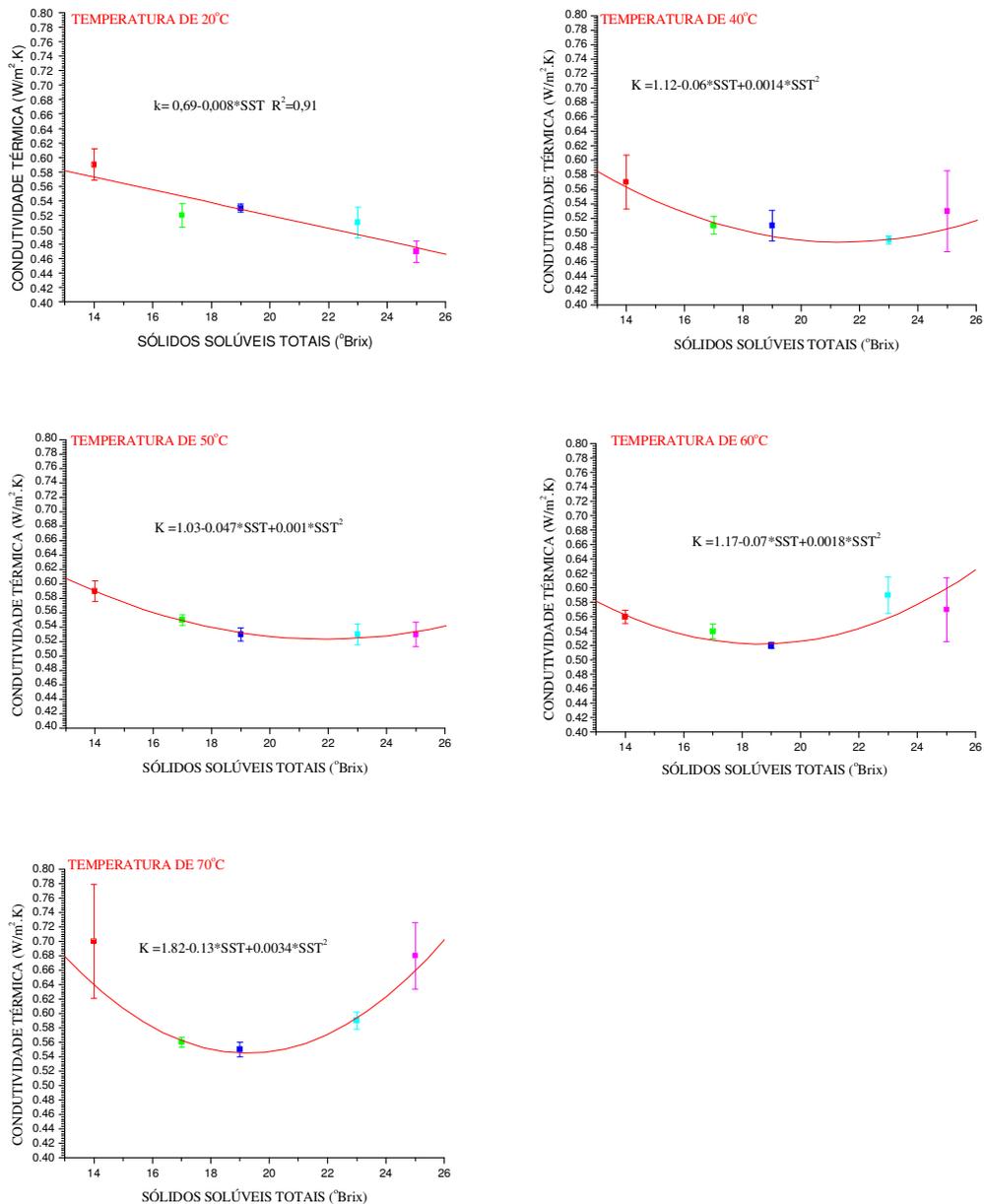
Também para esta variável se ajustou, por análise de regressão, um modelo polinomial, relacionando a condutividade térmica (*k*) com os sólidos solúveis totais (SST) em cada temperatura utilizada no experimento. Os parâmetros obtidos neste modelo estão na Tabela 12.

Para a condutividade térmica, observou-se que o modelo linear descreveu melhor os dados para a temperatura de 20°C, havendo, neste caso, uma diminuição da condutividade térmica com os SST. Nenhum dos modelos (linear ou quadrático) descreveu bem os dados experimentais, para as temperaturas de (25 e 30)°C. Nos demais casos, houve um bom ajuste do modelo quadrático. A condutividade térmica, nestes casos, diminuiu com os SST até a concentração de 19°Brix, passando, a seguir, a aumentar de valor. Este comportamento foi verificado por BAUMER *et al.* (2006), ao investigar a condutividade térmica de banana relacionando com a umidade, verificaram que a condutividade se comportou de forma irregular; a condutividade variou de 0,442744 – 0,333358 W/m<sup>2</sup>.K para umidade de 73,35000 – 69,96157, porém no decorrer do intervalo a condutividade não apresentou uma sequência de redução, os autores atribuíram esses resultados, pelo fato que houve presença de porosidade e direção das fibras. Na Figura 16 estão os gráficos referentes às expressões descritas na Tabela 12, com os respectivos dados obtidos.

**Tabela 12. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a condutividade térmica ( $K$ ) em  $W/m^2.K$  com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $K = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura (°C)	A	B	C	$R^2$
20	0,69±0,04	-0,008±0,002	--	0,91
25	0,3±0,6	0,03±0,06	-0,0007±0,001	0,32
30	0,63±0,31	-0,007±0,03	0,0001±0,0007	0,25
40	1,12±0,29	-0,06±0,03	0,0014±0,0007	0,88
50	1,03±0,06	-0,047±0,007	0,0010±0,0001	0,98
60	1,17±0,23	-0,07±0,02	0,0018±0,0007	0,83
70	1,82±0,35	-0,13±0,04	0,0034±0,0009	0,92

Existem várias razões possíveis, para a variabilidade da condutividade térmica não ser previsível por modelos simples (linear e quadrático). A polpa de cupuaçu possui, em sua composição química, componentes sólidos e estritamente líquidos, além da possibilidade de fases gasosas internas.



**Figura 16. Relações entre condutividade térmica (K) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu.**

A condução de matérias sólidas está intimamente ligada ao aumento da energia cinética das moléculas que, nos condutores, podem oscilar a grande velocidade e amplitudes. Esta excitação molecular, referida em inglês como “bumping” propaga-se pelo material e, conseqüentemente, continua o processo de transmissão de calor (condução). Portanto, a condutividade térmica depende tanto da estrutura molecular como da composição química (nível eletrônico atômico) e também da

estruturaco física na qual as moléculas se inserem (estrutura física). Figura e Teixeira (2003) comentam que no caso de sucos de frutas a condutividade térmica  próxima daquela correspondente  água pura, porém, certos alimentos podem conter ar atmosférico e outros gases, retidos. Neste caso, a condutividade pode ser bastante alta e extremamente dependente do teor destes gases na estrutura do material. Portanto, ainda segundo Figura e Teixeira (2003), a condutividade térmica nestes sistemas, contendo sólidos, líquidos e gases deve ser registrada como condutividade térmica aparente. Nestes sistemas, a taxa total de conduo de calor  maior que aquele que ocorreria na conduo pura. A condutividade aparente observada pode, inclusive, ser maior que a soma das condutividades térmicas de todos os componentes da mistura.

O valor mínimo de difusividade térmica foi de 0,132 mm<sup>2</sup>/s na temperatura de 20°C e 25 °Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de 0,169 mm<sup>2</sup>/s, na temperatura de 70°C e 14°Brix de sólidos solúveis totais. Esta variável apresentou erros na faixa de 0,0001 a 0,009 mm<sup>2</sup>/s. Vários autores observaram valores aproximados aos obtidos como para sucos de frutas tropicais - cupuaçu, açaí e graviola (MOURA *et al.*, 1998), polpa de manga (SIMÕES *et al.*, 2000), massa de tomate (CARBONERA *et al.*, 2003), polpa de umbu (LIMA *et al.*, 2003), polpa de cupuaçu (ARAÚJO *et al.*, 2004), polpa de caju (AZOUBEL *et al.*, 2005), suco de amora (CABRAL *et al.*, 2007), mamão e caju (KURASAWA *et al.*, 2008), frutos pequenos-framboesa, amora, mirtilo e morango (SOUZA D., 2008) e uva, pepino e laranja (MURAMATSU *et al.*, 2010).

Cabe salientar que esta é a difusividade aparente da polpa, uma vez que o produto  heterogneo, por possuir sólidos em suspensão e ar disperso em sua estrutura.

De forma análoga às outras propriedades termofísicas para a difusividade térmica foi feita uma análise de regressão linear e polinomial de segundo grau, correlacionando esta variável com os SST, para cada temperatura. A tabela 13 mostra as equaoes obtidas nos ajustes destes modelos, com seus respectivos coeficientes de determinao.

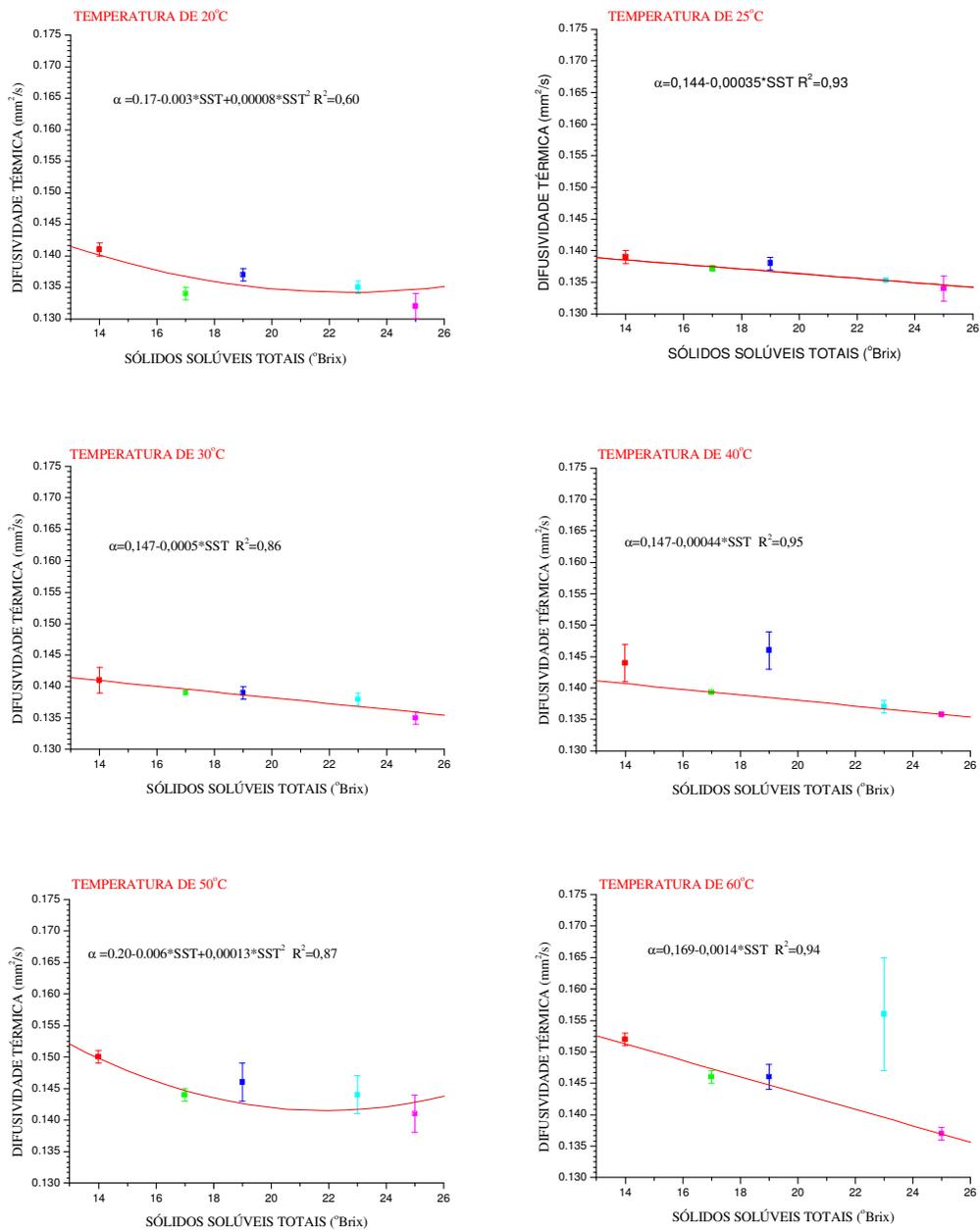
**Tabela 13. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando a difusividade térmica ( $\alpha$ ) em mm<sup>2</sup>/s com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $\alpha = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores dos coeficientes de determinao (R<sup>2</sup>)**

Temperatura (°C)	A	B	C	R <sup>2</sup>
20	0,17±0,04	-0,003±0,004	0,00008±0,0001	0,60
25	0,144±0,001	-0,00035±0,00005	---	0,93
30	0,147±0,002	-0,0005±0,0001	---	0,86
40	0,147±0,001	-0,00044±0,00006	---	0,95
50	0,20±0,02	-0,006±0,003	0,00013±0,00007	0,87
60	0,169±0,003	-0,0013±0,0001	---	0,94
70	0,1±0,2	0,004±0,02	-0,0001±0,0005	0,11

Observou-se, no caso da variável difusividade térmica, que nenhum dos modelos (linear ou quadrático) se ajustou bem aos dados experimentais, para a temperatura de 70°C, uma vez que apresentou valores um pouco maior dos demais, este comportamento também foi verificado por SOUZA, (2008). Para as demais temperaturas, o modelo polinomial de segundo grau se ajustou melhor às temperaturas de (20 e 50)°C sendo que para as demais temperaturas o melhor modelo foi o modelo linear. SAKIYAMA *et al.* (1999) estudando materiais alimentícios porosos (géis alimentícios impregnados com bolhas de ar) em função da temperatura e observaram que a difusividade térmica não varia lineamente com a temperatura, atribuindo este desvio da linearidade diretamente proporcional à fração de ar dispersa na amostra. Como as polpas são ricas em substâncias pécicas (que formam géis), possivelmente apresentam viscosidades elevadas, e, por possuírem ar disperso em sua estrutura, era de se esperar que suas difusividades térmicas apresentassem este comportamento.

MOURA *et al.* (1998), determinaram as propriedades termofísicas experimentalmente sucos de frutas tropicais (cupuaçu, açaí e graviola) nas temperaturas na faixa de (10 a 80)°C a difusividade térmica teve um mínimo de  $1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  na temperatura de 50°C para um máximo de  $1,62 \times 10^{-7}$  a temperatura de 70°C para suco de cupuaçu. Eles perceberam que os valores de difusividade aumentaram com o aumento da temperatura e atribuíram esse comportamento a adição de ágar dissolvido no suco, conseqüentemente aumentando a convecção do sistema.

A Figura 17 mostra as relações obtidas com os respectivos dados experimentais. Observou-se que, de forma geral, a difusividade térmica diminuiu com o aumento do SST.



**Figura 17. Relações entre difusividade ( $\alpha$ ) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu.**

AZOUBEL *et al.* (2005), observaram comportamento semelhante ao medirem as propriedades termofísicas da polpa de caju a 30°C com conteúdo de sólidos solúveis na faixa de (5,5 a 25)°Brix, eles atribuíram essas diferenças ao conteúdo de água no suco, que com o aumento de fração de água tende ao aumento nas propriedades termofísicas, principalmente a difusividade térmica. MARIANI *et al.* (2008), verificaram que durante a secagem de banana, houve a diminuição da difusividade térmica

e relacionaram com a diminuição do conteúdo de umidade. Este comportamento também foi verificado por AVIARA e HAQUE (2001).

Mesmo nos casos em que o modelo polinomial do segundo grau se ajustou melhor, no caso da temperatura de 20°C, embora o valor mínimo ocorra em torno de 19°Brix, a variação que se segue tem valor próximos dos erros obtidos na precisão dos dados obtidos. Da mesma forma, para a temperatura de 50°C, o valor mínimo ocorre no valor de SST de 25°Brix que é exatamente o último da faixa. Sendo assim, uma vez que se trata de um modelo puramente estatístico, os resultados, e a configuração geral do modelo, apontam para uma diminuição do valor da difusividade térmica com os SST, na faixa de temperaturas e nas concentrações estudadas.

Para o calor específico, o valor mínimo foi de  $3,34 \cdot 10^3 \text{ J/kg.K}$ , na temperatura de 40°C e 19°Brix de sólidos solúveis totais e o valor máximo foi de  $4,47 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$  na temperatura de 70°C e 25°Brix de sólidos solúveis totais. Esta variável apresentou erros na faixa de  $(0,01 \text{ a } 0,39) \cdot 10^3 \text{ J/kg.K}$ . Os valores obtidos para o calor específico para polpa de cupuaçu foram próximos aos obtidos para frutas tropicais – cupuaçu, açaí e graviola (MOURA *et al.*, 1998); polpa de umbu (LIMA *et al.*, 2003); polpa de cupuaçu (ARAUJO *et al.*, 2004); suco de amora (CABRAL *et al.*, 2007); polpa de bacuri (MUNIZ *et al.*, 2006) e sucos de frutas – uva, pepino e laranja (MURAMATSU *et al.*, 2010).

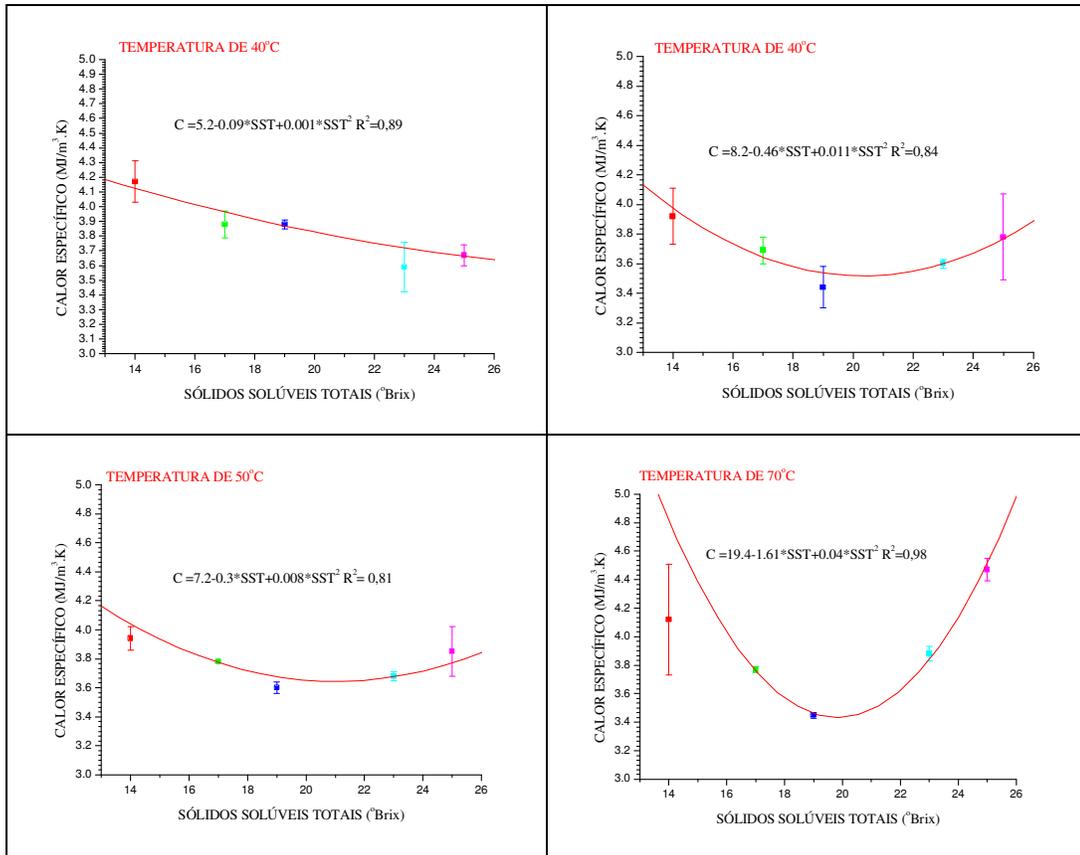
A Tabela 14 mostra os resultados dos parâmetros obtidos, nos ajustes de modelos de regressão, relacionando o calor específico (C) com os sólidos solúveis totais (SST).

**Tabela 14. Valores dos parâmetros do modelo polinomial de segundo grau, correlacionando o calor específico (C) em  $10^3 \text{ J/(kg.K)}$  com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $C = A + B * SST + C * SST^2$ ), com os respectivos valores do coeficientes de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura °C	A	B	C	R <sup>2</sup>
20	5,22±1,1	-0,09±0,1	0,001±0,02	0,89
25	1,3±2,8	0,26±0,27	0,006±0,006	0,40
30	5,4±2,0	-0,17±0,2	0,004±0,005	0,34
40	8,2±1,6	-0,46±0,16	0,011±0,004	0,84
50	7,2±1,7	-0,3±0,2	0,008±0,004	0,81
60	5,0±3,0	-0,1±0,4	0,003±0,009	0,13
70	19,4±1,6	-1,61±0,16	-0,04±0,04	0,98

Para as temperaturas de (25, 30 e 60)°C o modelo não descreveu bem os dados experimentais. A Figura 18 mostra as relações obtidas, no caso em que o modelo ajustou-se bem aos dados ( $R^2 > 0,8$ ). Nestes casos, observou-se, também para esta variável, uma tendência de diminuição do calor específico com o aumento dos sólidos solúveis totais (SST), nas baixas temperaturas sendo que, para temperaturas maiores que 40°C, ocorre uma diminuição inicial seguida de aumento do valor do calor

específico, a partir de concentração de 19°Brix. MUNIZ *et al.* (2006), observaram um aumento do calor específico com o aumento na fração de água para polpa de bacuri.



**Figura 18. Relações entre calor específico (C) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu.**

A massa específica apresentou valor mínimo de 1032,4 g/m<sup>3</sup> na temperatura de 60°C e sólidos solúveis totais de 14°Brix. Seu valor máximo foi de 1108,9 g/m<sup>3</sup> na temperatura de 20°C e sólidos solúveis totais de 25°Brix. Estes valores estão próximos dos apresentados por alguns autores como JÚNIOR *et al.* (2007), para predição da massa específica da manga espada; ARAÚJO *et al.* (2002) da polpa de cupuaçu; LIMA *et al.* (2003) polpas de umbu; MUNIZ *et al.* (2006) polpa de bacuri; ZURITZ *et al.* (2005) sucos de uvas clarificados.

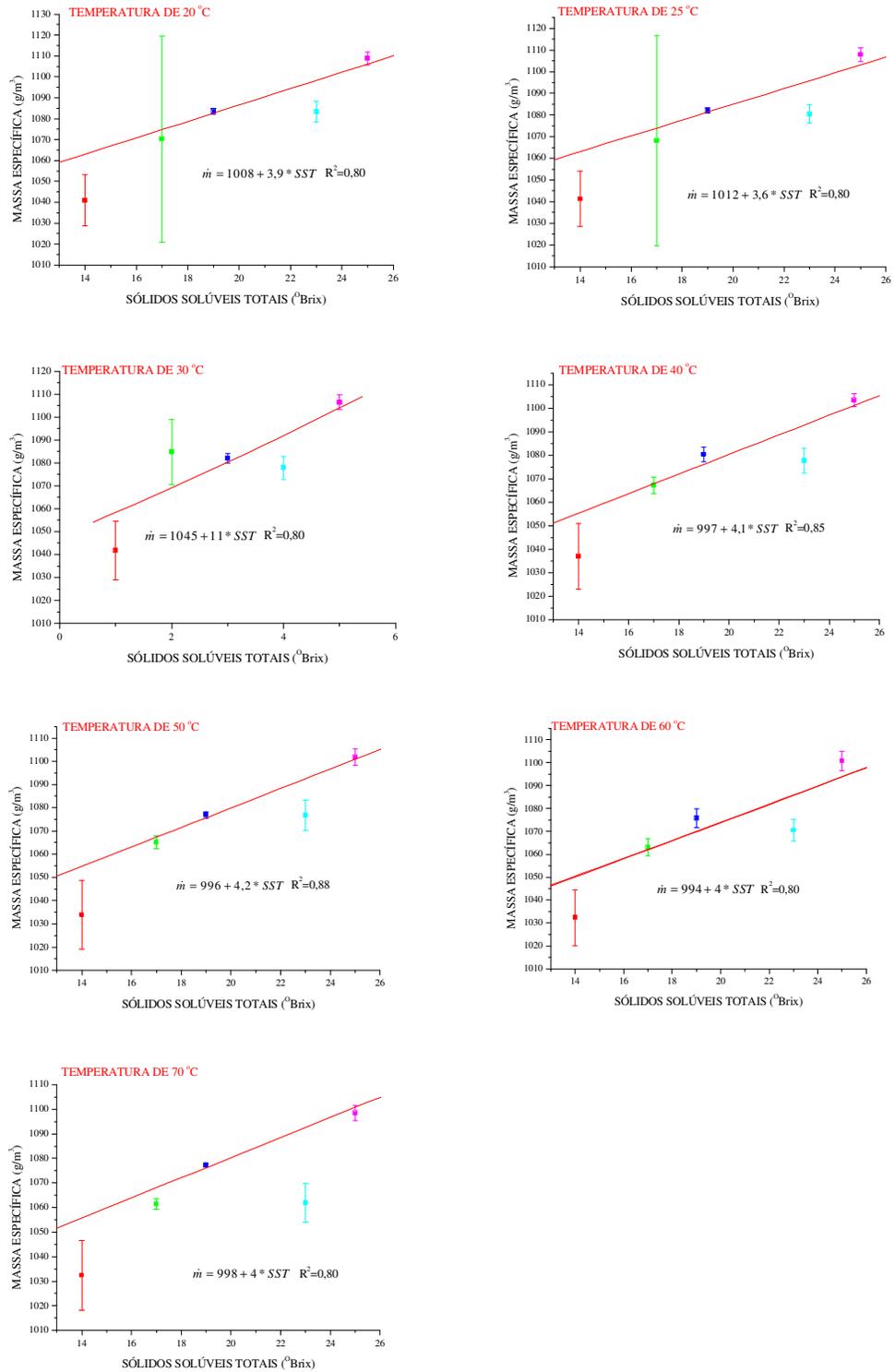
O modelo linear se ajustou melhor que o quadrático, para a relação entre a massa específica e os sólidos solúveis totais, nas temperaturas estudadas. A Tabela 15 mostra os parâmetros deste modelo, com os respectivos coeficientes de determinação e na Figura 18 estão os gráficos mostra as equações obtidas e os dados experimentais.

**Tabela 15. Valores dos parâmetros do modelo de regressão linear correlacionando a massa específica ( $\rho$ ) em  $\text{g/m}^3$  com os sólidos solúveis totais (SST) expressos em graus Brix, em cada temperatura, para a polpa de cupuaçu ( $\rho = A + B * SST$ ), com os respectivos valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ )**

Temperatura °C	A	B	$R^2$
20	1008,0±22,0	3,9±1,1	0,80
25	1012,0±26,0	3,6±1,2	0,80
30	1045,0±13,0	11,0±3,5	0,80
40	997,0±21,0	4,1±0,1	0,85
50	996,0±18,0	4,2±0,9	0,88
60	994,0±30,0	4,0±1,4	0,80
70	998,0±27,0	4,0±1,4	0,80

Observou-se que a taxa de variação da massa específica com os SST aumentou da temperatura de 20°C até a temperatura de 40°C, a partir desta temperatura, os modelos ajustados podem ser considerados iguais, com uma taxa de variação de  $4 \text{ g/m}^3 \cdot ^\circ\text{Brix}$ . Isto significa que a taxa de variação da massa específica com os SST, passou a não variar com a temperatura, a partir da temperatura de 40°C. JUNIOR *et al.* (2007); ARAÚJO *et al.* (2002); LIMA *et al.* (2003); PEREIRA *et al.* (2002); MUNIZ *et al.* (2006); ZURITZ *et al.* (2005) e AZOUBEL *et al.* (2005) ao estudarem as propriedades físicas de sucos e polpas de frutas observaram que a massa específica diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento do teor de sólidos solúveis. SOUZA (2008) também verificou o mesmo comportamento dos demais e relacionou a expansão volumétrica sofrida pelas polpas e néctares de pequenos frutos, uma vez que a energia fornecida ao sistema faz com que suas moléculas vibrem com velocidades maiores, ficando cada vez mais afastadas umas das outras. Além disso, o aumento do teor de sólidos, provocado pela adição de açúcar, faz com que a massa específica aparente das polpas aumente.

A massa específica de sucos e polpa de frutas em função da temperatura segue em sua maioria uma relação linear. Este comportamento é similar ao da água na faixa de temperatura entre (20 a 80)°C. Porém quando se trabalha com líquidos viscosos impregnados com bolhas de ar, como polpas de frutas ricas em substâncias pécicas, por exemplo, o modelo linear pode não representar corretamente o comportamento do sistema. Isto ocorre em razão da presença de bolhas de ar, que fazem com que o sistema seja um meio poroso complexo. Assim, como os coeficientes de dilatação térmica de líquidos e de gases são distintos, o aumento de volume das fases líquida e gasosa deste sistema com a temperatura pode não seguir um comportamento linear (SOUZA, 2008).



**Figura 19. Relações entre massa específica ( $\rho$ ) e os sólidos solúveis totais (SST), em diferentes temperaturas, para a polpa de cupuaçu**

Os valores mínimos da acidez titulável e de pH foram de 2,90 e 3,097, para os teores de sólidos solúveis de 14 e 25 °Brix, respectivamente, e os valores máximos foram 5,36 e 3,219, neste caso, invertendo-se as respectivas concentrações. Ou seja, como era esperado, ao se concentrar a polpa, devido à retirada de água, aumentou-se a acidez titulável com conseqüente redução do pH. Na Tabela 16 encontram-se os valores obtidos de pH e acidez titulável, em cada concentração da polpa.

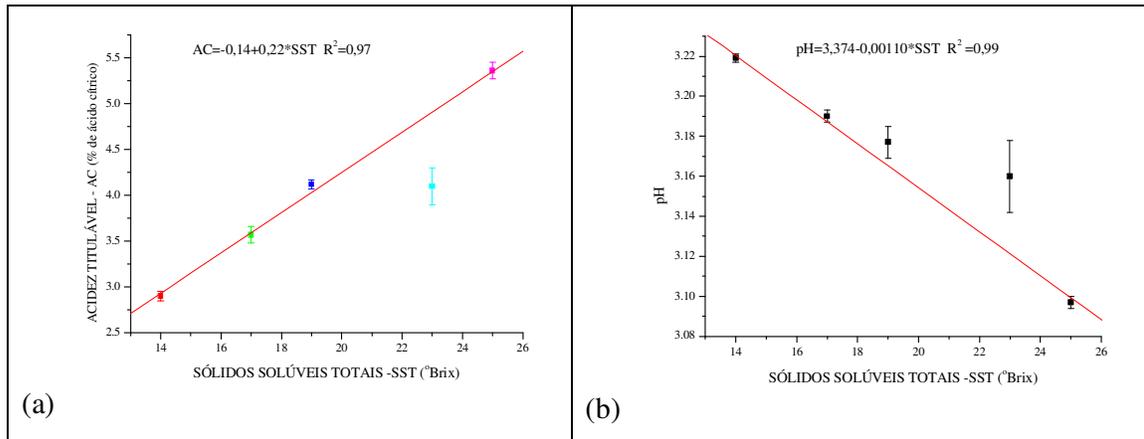
**Tabela 16. Valores de acidez titulável e pH, para a polpa de cupuaçu, em diferentes teores de sólidos solúveis totais.**

SST (°Brix)	Acidez Titulável (% de ácido cítrico)	pH
14	2,90±0,05	3,219±0,002
17	3,57±0,09	3,190±0,003
19	4,12±0,05	3,177±0,008
23	4,10±0,2	3,160±0,018
25	5,36±0,09	3,097±0,003

Embora seja de se esperar que, num dado momento haverá uma inflexão em ambas as curvas, ou seja, naquela que relaciona acidez titulável com SST, bem como na que relaciona pH com esta variável, na faixa de concentrações estudadas, o modelo linear ajustou-se bem aos dados. A Tabela 17 mostra os coeficientes do ajuste, feito por regressão linear, entre pH e SST bem como entre Acidez titulável e SST. Na figura 20 estão os gráficos das relações obtidas, com as respectivas equações e coeficientes de correlação.

**Tabela 17. Coeficientes das equações de regressão linear, relacionando pH ou acidez titulável, expressa em % de ácido cítrico (AC) com os SST, expressos em graus Brix, para a polpa de cupuaçu (pH= A+B\*SST ou AC=A+B\*SST) .**

Propriedade	A	B	R <sup>2</sup>
Acidez Titulável	-0,1±0,4	0,22±0,02	0,97
pH	3,374±0,009	-0,0011±0,0005	0,99



**Figura 20. Relações entre pH e acidez titulável com os sólidos solúveis totais (SST), para a polpa de cupuaçu**

### 4.3 Relações entre as Propriedades reológicas e termofísicas

#### 4.3.1 Correlações entre parâmetros do modelo reológico e propriedades termofísicas

##### Valores gerais

Os coeficientes de correlação de Pearson, entre os valores dos parâmetros do modelo de Windhab ajustado e as propriedades termofísicas da polpa de cupuaçu, estão na Tabela 18. Esta correlação foi realizada, para mostrar o quanto uma grandeza está relacionada linearmente com a outra.

Não se encontrou nenhum valor alto de correlação (acima de 0,8). Contudo, observaram-se valores muito baixos de correlação entre os parâmetros  $n_a$  e  $\dot{\gamma}^*$  com o parâmetro  $\tau_1$  do modelo de Windhab (0,006 e -0,02, respectivamente). Por outro lado, estes mesmos parâmetros apresentam alguma correlação com  $\tau_0$ , sendo esta positiva para  $n_a$  (0,49) e negativa para  $\dot{\gamma}^*$  (-0,53). Desta forma, observou-se, portanto, uma dependência, ainda que não estrita, entre os valores de  $n_a$  e  $\dot{\gamma}^*$  com os valores de  $\tau_0$ .

Observaram-se valores médios de correlação (acima de 0,5) entre a massa específica e o parâmetro  $\tau_0$  do modelo de Windhab (0,60). Fisicamente, realmente se espera que a polpa mais densa apresente maior tensão de cisalhamento residual, ou seja, que seja necessária uma maior força, para iniciar o movimento de uma polpa mais densa. A tabela 18 mostra os valores dos coeficientes de

correlação de Pearson, mostrando o quanto uma grandeza está relacionada linearmente uma com a outra.

**Tabela 18. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson, relacionando os parâmetros do modelo ajustado de Winhab para o comportamento reológico e as variáveis termofísicas Condutividade Elétrica, Condutividade Térmica, Difusividade Térmica, Calor Específico e Massa Específica para a polpa de Cupuaçu.**

	$\tau_0$	$\tau_1$	$\dot{\gamma}^*$	$n_a$	Condutividade Elétrica	Condutividade Térmica	Difusividade	Calor Específico	Massa Específica
$\tau_0$	1,00	0,35	-0,53	0,49	-0,14	-0,40	-0,43	-0,05	0,60
$\tau_1$	0,35	1,00	-0,02	0,06	-0,28	-0,51	-0,55	-0,23	0,49
$\dot{\gamma}^*$	-0,53	-0,02	1,00	-0,28	0,09	-0,01	0,35	-0,37	-0,39
$n_a$	0,49	0,06	-0,28	1,00	-0,08	-0,25	-0,24	-0,07	0,32
Condutividade Elétrica	-0,14	-0,28	0,09	-0,08	1,00	0,36	0,34	0,15	-0,14
Condutividade Térmica	-0,40	-0,51	-0,01	-0,25	0,36	1,00	0,67	0,72	-0,46
Difusividade	-0,43	-0,55	0,35	-0,24	0,34	0,67	1,00	0,02	-0,55
Calor Específico	-0,05	-0,23	-0,37	-0,07	0,15	0,72	0,02	1,00	-0,15
Massa Específica	0,60	0,49	-0,39	0,32	-0,14	-0,46	-0,55	-0,15	1,00

Ainda entre valores médios de correlação, observaram-se valores negativos de -0,51 e -0,55, entre a condutividade térmica e a difusividade térmica, respectivamente, com o parâmetro  $\tau_1$ . A condutividade e difusividade térmica estão relacionadas, com a vibração de moléculas e com a estrutura molecular da polpa, ou seja, estão ligadas a aspectos microscópicos. Contudo, o reflexo macroscópico de altos valores de condutividade e difusividade é tal que, pode-se correlacioná-los com a possibilidade de fluir da polpa, ou seja, com valores menores de  $\tau_1$ .

Como era de esperado, se encontrou coeficientes de correlação médios entre Difusividade, Calor específico e massa específica (0,67; 0,72 e -0,46, respectivamente) com a Condutividade Térmica, bem como entre Difusividade térmica e massa específica, uma vez que há uma relação direta entre estes parâmetros.

#### 4 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu avaliar o comportamento reológico e propriedades termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e massa específica) da polpa do cupuaçu. Os dados obtidos neste trabalho serão úteis em análises de processos de transferência de calor e massa em produtos de polpas de frutas e otimização de processos envolvendo a polpa de cupuaçu.

Os objetivos do presente trabalho foram atingidos, dentre eles, a possibilidade de concentração da polpa utilizando um evaporador rotativo, a avaliação do comportamento reológico e a obtenção das propriedades termofísicas.

Dos modelos reológicos utilizados no trabalho observou-se que o modelo de Windhab pode ser escolhido para descrever o comportamento reológico da polpa de cupuaçu, pois apresenta um coeficiente estatístico de determinação próximo a um e valores de quiquadrado próximos a zero. As polpas de cupuaçu utilizadas exibiram um comportamento tixotrópico, uma vez que em vários momentos houve diferença entre os parâmetros do modelo de Windhab ( $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\dot{\gamma}$  e  $\eta_{ap}$ ) quando houve aumento do cisalhamento, em relação a condição de cisalhamento. A tensão inicial mostrou-se dependente da temperatura e da concentração da polpa. Como foi verificado diferenças entre os valores dos parâmetros para as condições de IDA e VOLTA, fez-se uma análise geral tanto para  $\tau_0$  quanto para  $\tau_1$  em função da temperatura e da concentração de sólidos solúveis. Observou-se que os valores obtidos de  $\tau_0$  aumentaram com o aumento da concentração da polpa, sendo os resultados condizentes com os da literatura para polpas e sucos de frutas e através de uma equação de regressão linear múltipla pode-se obter uma superfície de resposta, que mostrou a dependência de  $\tau_0$  mais da concentração da polpa do que da temperatura. Quanto ao parâmetro  $\tau_1$ , verificou-se também uma dependência deste da temperatura, concentração e comportamento tixotrópico da polpa e com a análise de regressão só se passou a observar um efeito linear entre a temperatura, concentração e parâmetro a partir da temperatura de 40°C. No que se diz ao parâmetro viscosidade não foi possível encontrar um modelo que descrevesse seu comportamento. Permitindo observar somente que na temperatura de 20°C este parâmetro apresentou os maiores valores. E em relação a  $\dot{\gamma}$  com a análise de regressão linear, esta diminuiu com o aumento da SST para cada temperatura estudada, indicando que quanto mais concentrada a polpa, mais rapidamente ela atingirá o equilíbrio. Através de uma regressão linear múltipla foi possível observar através da superfície de resposta que  $\dot{\gamma}$  depende mais da concentração do que da temperatura da polpa.

Como era esperada a concentração da polpa levou a diminuição de sua atividade de água, que foi descrito por um modelo cúbico da análise de regressão polinomial.

Para as propriedades termofísicas os valores variaram de 6,38 S/m (20°C/19°Brix) a 8,50 S/m (70°C/17°Brix) para condutividade elétrica; 0,47 W/m<sup>2</sup>.K (20°C/25°Brix) a 0,7 W/(m<sup>2</sup>.K) (70°C/14°Brix) para condutividade térmica; 0,132 mm<sup>2</sup>/s (20°C/25°Brix) a 0,169 mm<sup>2</sup>/s (70°C/14°Brix) para difusividade térmica; 3,34kJ/(kg.K) (40°C/19°Brix) a 4,47 kJ/kg.K (70°C/25°Brix) para calor específico e 1032,4 g/m<sup>3</sup> (60°C/14°Brix) a 1108,9 (20°C/25°Brix) para massa específica – os valores obtidos para tais propriedades, exceto condutividade elétrica- estão próximos dos valores encontrados na literatura.

Utilizando análises de regressão foi possível verificar o comportamento da polpa quanto as propriedades termofísicas em relação a concentração e a temperatura. No que se refere a condutividade elétrica diminuiu com o aumento da temperatura a partir da temperatura de 40°C; a condutividade térmica diminuiu com o aumento dos SST até 19°Brix e após este valor aumentou; a difusividade térmica diminuiu com o aumento dos SST; o calor específico diminuiu com o aumento das SST nas baixas temperaturas e para maiores que 40°C verificou uma diminuição inicial seguida de um aumento a partir de 19°Brix; a massa específica aumentou de (20 a 40)°C com o aumento dos SST e depois de 40°C passou a não variar mais.

Como era esperado, ao se concentrar a polpa, devido à retirada de água, aumentou-se a acidez titulável com conseqüente redução do pH.

Ao relacionar as propriedades reológicas e termofísicas não foi encontrado nenhum coeficiente alto de correlação, ou seja, maior que 0,8, não pôde-se observar uma correlação linear entre os parâmetros ajustados do modelo de Windhab. Porém foi possível observar ainda que não estritamente relação entre as propriedades termofísicas.

Os dados obtidos tanto para as propriedades termofísicas como para o comportamento reológico serão úteis para as Indústrias de Alimentos na otimização de processos para produção de polpas de frutas, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, J. Rheological Behavior and Colour Changes of Ginger Paste During Storage. *International Journal of Food Science and Technology*, v.39, p. 325-330, 2004.

AHMED, J., RAMASWAMY, H.S.; NGADI, O. Rheological characteristics of Arabic gum in combination with guar and xanthan gum using response surface methodology: effect of temperature and concentration. *International Journal of Food Properties*, v.8, p.179–192, 2005a.

AHMED, J., RAMASWAMY, H.S.; HIREMATH, N. The effect of high pressure treatment on rheological characteristics and colour of mango pulp. *International Journal of Food Science and Technology*, v.40, p. 885–895, 2005b.

AHMED, J.; RAMASWAMY, H. S.; SASHIDHAR, K. C. Rheological characteristics of tamarind (*Tamarindus indica L.*) juice concentrates. *Food Science and Technology*, p. 225–231, 2007.

AKBULUT, M.; ÇOKLAR, H.; ÖZEN, G. Rheological Characteristics of Juniperus drupacea Fruit Juice (pekmez) Concentrated by Boiling. *Food Science and Technology International*, v.14; p. 321, 2008.

AOAC (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALITICAL CHEMISTRY). Official methods of analysis; edited by Sidney Williams. 16ed. Arlington, 1997.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades Termofísicas da Polpa do Cupuaçu com Diferentes Teores de Sólidos. *Ciênc. agrotec., Lavras*, v. 28, n.1, p. 126-134, 2004.

AVIARA, N. A.; HAQUE, M. A. Moisture dependence of thermal properties of sheanut kernel. *Journal of Food Engineering*, v.47, 109-113, 2001.

AZOUBEL, P.M.; CIPRIANI, D. C.; EL-AOUAR, A. A.; ANTONIO, G. C.; MURR, F. E. X. Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. *Journal of Food Engineering*, v.66, p. 413-417, 2005.

BAUMER, J. E.; MARIANI, V. C.; MENDES, L. A. Investigação Experimental da Condutividade Térmica da Banana. XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, Curitiba, PR, CRICTE, 2006.

BECKETT, S. T.; AESCHLIMANN, J. M. International Interlaboratory Trials to Determine the Factors Affecting the Measurement of Chocolate Viscosity. *Journal of Texture Studies*, v.31, p.541-576, 2000.

BECKETT, S. T. Casson Model for Chocolate, Friend or Foe. *The Manufacturing Confectioner*, p.61-69, 2001.

BRANCO, I.G. Suco de laranja concentrado-comportamento reológico a baixas temperaturas (pp. 91). M.S. thesis. Campinas, Brasil: Universidade de Campinas, 1995.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C.A. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para o estudo do efeito da temperatura sobre o comportamento reológico de misturas ternárias de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 23, 166-171, 2003.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. Química do processamento de alimentos. 3ed., São Paulo: Varela, 2001.

CABRAL, M. F. P.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Comportamento Reológico da Polpa de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) Peneirada. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.4, n.1, p.37-40, 2002.

CABRAL, R. A. F.; ORREGO-ALZATE, C. E.; GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J. Rheological and thermophysical properties of blackberry juice. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 27(3): 589-596, jul.-set. 2007.

CARVALHO, A. V., Extração, concentração e caracterização físico-química e funcional das proteínas de semente de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum), Campinas, 2004, p. Tese de doutorado (Doutor em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UNICAMP).

CARBONERA, L.; CARCIOF, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Determinação Experimental da Difusividade Térmica de uma Massa de Tomate Comercial. *Brazilian Journal of Food Technology*, v.6, n.2, p.285-290, jul.-dez., 2003.

CASTRO, A. L., Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho, São Carlos, 2007, p, Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais), Área de Interinidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo (USP).

CASTRO, I.; TEIXEIRA, J.A.; SALENGRE, S.; SASTRY, S.K. VICENTE, A. A. The Influence of Field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering*, v.26, p. 17-29, 2003.

CENTEV. Empresa Vinculada a Incubadora de Empresas de Base Tecnológica do CENTEV/UFV. Produção de frutas ganha força no Brasil. In: *Gazeta Mercantil*. Viçosa, MG, 2008. Disponível em: <http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php82>. Acesso em: 15 de janeiro de 2008.

CEPLAC - Comissão Executiva do Plano de Lavoura Cacaueira. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.br/radar/cupuacu.htm>. Acessado em: 17 de janeiro de 2009.

CHEVALLEY, C. Introduction to the Theory of Algebraic Functions of One Variable. American Mathematical Society. Disponível em: <http://www.ams.org>, v.6, 2000.

CHEVALLEY, J. An adaptation of the Casson equation for the Rheology of Chocolate. *Journal of Texture Studies*, v. 22, p. 219-229, 2007.

COHEN, K. O., Estudo do processo de temperagem do chocolate ao leite e de produtos análogos elaborados com líquido e gordura de cupuaçu, Campinas, 2003. Tese de doutorado (Doutor em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

CONSTENLA, D.T.; LOZANO, J.E.; CRAPISTE, G.H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Science*, v.54, n.3, p.663-668, 1989.

DINIZ, E.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Atividade de água e condutividade elétrica de polpas de acerola concentradas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, Especial, n.1, p.9-17, 2003

EGAWA, E. Y., Caracterização térmica e reológica de blendas de glicerol: colágeno tipo I de diferentes tecidos, São Carlos, 2007, p, Dissertação (Mestrado em Ciência – Química Analítica), Instituto de Química de São Paulo, Universidade de São Paulo (USP).

FERGUSON, J.; KEMBLOWSKI, Z. Applied fluid rheology. New York: Elsevier Applied Science. 323p, 1991.

FERREIRA, G. M.; QUEIROZ, A. J. M. Q.; CONCEIÇÃO, R. S.; GASPARETTO, C. A. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. Revista Ciências Exatas e Naturais, v. 4, n.2, jul.-dez., 2002.

FERREIRA, G.M.; QUEIROZ, A. J. M.; CONCEIÇÃO, R.S.; GASPARETTO, C.A., Reologia de misturas de polpas de goiaba e caju peneiradas. Revista Estudos Tecnológicos –Engenharia, São Leopoldo, v.14, n.25, p.49-55, 2003.

FERREIRA, G. M.; GUIMARÃES, M. J. O. C.; MAIA, C. A. M. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da polpa de cupuaçu (*t. grandiflorum schum*) integral. Revista Brasileira de Fruticultura de Jaboticabal, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2008.

FIGURA, L. O. e TEIXEIRA, A.A. Food Physical. Physical Properties- Measurement and applications. Springer, 2007.

FILHO, G. A. F.; RAMOS, J. V. Cupuaçuzeiro: Uma Atividade Econômica para o Sul da Bahia. In: I Encontro sobre Frutas Tropicais Nativas e Exóticas, Cruz das Almas, n. 159, p. 52-53, 2006.

FONTANA, A. J., VARITH, J., IKEDIALA, J., REYES, J. , WACKER, B. Thermal properties of selected foods using a dual needle heat-pulse sensor. ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, 1999, Toronto Canada.

FREUND, J. E.; SIMON, G. A. Estatística Aplicada – Economia, Administração e contabilidade, 9ª edição, Bookman, 1997.

GUTIERREZ, C.; SANCHES-HERENCIA, A. J.; MORENO, R. Métodos de determinación y análisis del punto de fluidez de suspensiones cerámicas. Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC. 28500 Arganda del Rey, Madrid. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 39 Núm. 1 Enero-Febrero 2000.

HAMINIUK, C. W. I. Comportamento reológico e fracionamento péctico das polpas integrais de araçá (*Psidium cattleianum sabine*) e amora-preta (*Rubus spp*). Dissertação (Mestre em Tecnologia de

Alimentos). Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de alimentos, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, CURITIBA, 2005.

HAMINIUK, C. W. I.; SIERAKOWSKI, M. R.; BRANCO, I. G.; MACIEL, G. M.; MASSON, M. L. Rheological study of ternary mixtures and pectic gels of red fruit pulps. *International Journal of Food Science and Technology*, v.42, p.629–639, 2007.

HARNANAN, S.W.; TEJINDER, S.; BAINS, G.S. Effect of processing, preservation and storage on rheology of guava pulp. *Journal of Texture Studies*, v.32, p.271-284, 2001.

HASSAN, B.H.; HOBANI, A.I. Flow Properties of Roselle (*Hibiscus sabdariffa L.*) Extract. *Journal of Food Engineering*, v35, 459-470, 1998.

HEINZ, W. The Casson flow equation: Its validity for suspension of paints. *Material Prufung*, v.1, p. 311-316, 1959.

IAL - INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas, métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 4 ed. São Paulo: IAL, 2004.

INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, 5ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, Brasil, p.698, 2003.

JUNIOR, A. R. O.; PARENTE, V.M.; COSTA, A. M. Projeto de potencialidades regionais estudo de viabilidade econômica, Cupuaçu. Fundação Getúlio Vargas. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Manaus, p. 3, 2003.

KUROZAWA, L. E.; PARK, K. J.; HUBINGER, M. D.; MURR, F. E. X. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya L.*) and cashew apple (*Anacardium occidentale L.*). *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 11, n.1, p. 78-85, jan.-mar., 2008.

KOOCHEKI, A.; GHANDI, A.; RAZAVI, S. M. A.; MORTAZAVIL, S. A.; VASILJEVIC, T. The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *International Journal of Food Science and Technology* v.44, p.596–602, 2009.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L.; AMARAL, R. L. Formulação de chocolate de cupuaçu e reologia do produto líquido. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* vol. 38, n. 4, out.-dez., 2002.

LEWIS, M.J. Propriedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Zaragoza: ACRIBIA, 1993. 494p.

LIMA, J. E. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE UMBU. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, Especial, n.1, p.31-42, 2003.

LOZANO, J. E. Fruit Manufacturing- Scientific Basis, Engineering Properties, and Deteriorative Reactions of Technological Importance. Springer Science Business Media, LLC. Bahia Blanca Argentina, 2006.

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

MARIANI, V. C.; LIMA, A. G. B.; COELHO, L. S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. Journal of Food Engineering v.85, 569–579, 2008.

MARIANI, V. C.; AMARANTE, A. C.C.; COELHO, L. S. Estimation of apparent thermal conductivity of carrot purée during freezing using inverse problem. International Journal of Food Science and Technology , v.44, 1292–1303, 2009.

MATOS, O. C. Econometria Básica Teoria e Aplicações, editora ATLAS S.A., São Paulo, 1995.

MCCLEANS, D. J. Understanding and Conrolling the Microstructure of Complex Foods. Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2007.

MIQUELIM, J. N. Avaliação reológica e físico-química de bombons recheados com preparado de morango, laranja e maracujá em base açúcar fondant, gordura hidrogenada e chocolate branco, São Paulo, 2006. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Alimentos), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo (USP).

MOHSENIN, N.N. Thermal properties of foods and agricultural materials. New York: Gordon and Breach, 1980. 428 p.

MOURA, S. C. S. R.; GERMER, S. P. M.; JARDIM, D. C. P.; SADAHIRA, M. S. Thermophysical properties of tropical fruit juices. *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 1, n. 1-2, p. 70-76, 1998.

MOURA, S. C. S. R. M.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, M. C. B. L., Propriedades termofísicas de soluções modelos similares a sucos – Parte I, *Ciência Tecnologia Alimentos*, v.23, n.1, Campinas, Jan.-Apr. 2003.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; DUARTE, M. E. M. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. *Ciência Tecnologia Alimentos*, Campinas, v.26, n.2, p.360-368, abr.-jun. 2006.

MURAMATSU, Y.; SAKAGUCHI, E.; ORIKASA, T.; TAGAWA, A. Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method. *Journal of Food Engineering* v.96, 607–613, 2010.

NELSON, S.O. Electrical properties of grain and other food materials. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.2, p.137-154, 1978.

NINDO, C.I.; TANG, J.; POWERS, J.R.; TAKHAR, P.S. Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie*, Oxford, v.40, p.292-299, 2007.

OLIVEIRA, S. D; CAMARGO, D; MACHADO, P. P.; BORGES, S. V. Condutividade térmica do suco de laranja. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.3, n.1, p.101-104, 2001.

PALANIAPPAN, S.; SASTRY, S.K. Electrical conductivity of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, v.14, p. 2321-2360, 1991.

PEREIRA, N. R., Estudo comparativo do processo de torração de amêndoas de cupuaçu por microondas frente ao processo de torração convencional, Campinas, 2003. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

PEREIRA, E. A. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v.6, n.3, p.526-530, 2002.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Comportamento reológico de mel da abelha urucu (*Melipona scutellaris*, L.). *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol. 5, no 2, Jul.-Dez. 2003.

PEREIRA, E.A.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F. Propriedades termofísicas de polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 28, n. 1, p. 17-24, 2003.

PINHEIRO, G. S. Propriedades físicas, termofísicas e físico-químicas de purê de banana adicionados de açúcar, Lavras, 2004, p, Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos), Universidade Federal de Lavras (UFLA).

QUEIROZ, A. J. M.Q.; BEZERRA, J. R. M. V. B.; GASPARETTO, C. A. Influência dos sólidos insolúveis no comportamento reológico do suco de manga. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.1, n.1, p.27-32, 1999.

QUEIROZ, G. M., Determinação das propriedades termofísicas do pão tipo francês durante o processo de assamento, São Paulo, 2001, p, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP).

RAHMAN, M. S. *Food Properties Handbook*. CRC Press, Inc., FL. (1995).

REISDORFF, C. *Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) Schum., the cupuaçu-tree: additional use option of a cocoa relative. Disponível em: <<http://www.biologie.uni-hamburg.de/bzf/oknu/reisdorff>> Acessado em: 10 de janeiro de 2009.

SÁ, E. M. F. S.; LUIZ, M. T. B. Interação entre propriedades físico-químicas e físicas de queijos cremosos elaborados com xantana/locusta e xantana/guar. XVI Encontro de Química da Região Sul do Brasil. FURB, 13 a 15 de novembro 2008.

SANTOS, C. T.; MARQUES, G. M. R.; FONTAN, G. C. R.; FONTAN, R. C. I. BONOMO, R. C. F.; BONOMO, P. Elaboração e caracterização de uma bebida láctea fermentada com polpa de umbu (*Spondias tuberosa* sp.). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.8, n.2, p.111-116, 2006 .

SARANG, S.; SASTRY, S. K.; KNIPQ, L. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, v. 87, p. 351-356, 2008.

SATO, A. C. K.; CUNHA, R. L. Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jabuticaba. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 27 (4): 879-884, out-dez. 2007.

SATO, A. C. K. Influência do tamanho de partículas no comportamento reológico da polpa de jabuticaba, Campinas, 2005, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

SAUNDERS, P. R. The Properties of Chocolate in Relation to Structure. *Journal of Texture Studies*, v.22, n.2, p. 219-229, 1991.

SERVAIS, C; JONES, R.; ROBERTS, I. The Influence of Particle Size Distribution on the Processing of Food. *Journal of Food Engineering*, v. 51, p. 201-208, 2002.

SILVA, M.; MATA, M. E. R.M.; DUARTE, M. E. M.; NASCIMENTO, J. P.P.J.P.T. Resfriamento e propriedades termofísicas do cajá (*Spondias lútea L.*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.4, n.2, p.175-185, 2002.

SILVA, F.C.; GUIMARÃES, D. H.P.; GASPARETTO, C.A. Reologia do suco de acerola: Efeitos da concentração e temperatura. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 25(1): 121-126, jan.-mar., 2005.

SILVA, S. B. Propriedades Termofísicas de Polpa de Abacaxi. Campinas, Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1997.

SIMÕES, R. M. MURR, F. E. X. Determinação da difusividade térmica da polpa de manga. *Acta Scientiarum*, v. 22, n.5, p.1225-1228, 2000.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. *Introducción a la Ingeniería de los alimentos*. Zaragoza: Acribia, 1998, 544p.

SOARES, R. D. Secagem de manjeriço (*Ocimum basilicum*, L), com vistas a preservação do Linalol. Itapetinga, Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), 2006.

SOUSA, E. M. B.D.; LIMA, M. F. L.; SOUZA, J. S.; MORENO, M. T. Propriedades termofísicas de polpas de frutas Tropicais. I Brazilian Congress of Phase Equilibrium and Fluid Properties for Chemical Process Design, Natal/RN, 2000.

SOUZA, L. A. Teste de condutividade elétrica para avaliação da qualidade de sementes de mamona, Lavras. Dissertação (Mestre em Agronomia), Universidade Federal de Lavras (UFLA), p. 10-13, 2007.

SOUZA, D. Estudo das Propriedades Físicas de Polpa e Néctares de Pequenos Frutos, Porto Alegre. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2008.

SOUZA, L. A. Teste de condutividade elétrica para avaliação da qualidade de sementes de mamona, Lavras. Dissertação (Mestre em Agronomia), Universidade Federal de Lavras (UFLA), p. 10-13, 2007.

STEFFE, J. F. Rheological Methods in Food Process Engineering, 2<sup>a</sup> Ed, 1996, p. 255-291.

STEENEKEN, P. A. M. Rheological properties of aqueous suspensions of swollen starch granules. Carbohydrate Polymers, v.11, p.23-42, 1989.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITAH, F. Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content. Journal of Food Engineering, v. 38, p. 27-40, 1998.

VAN GELDER, M. A Thermistor based method for measurement of thermal conductivity and thermal diffusivity of moist food materials at high temperatures. 1998. 171 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological Systems Engineering) – Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, 1998.

VIDAL, J.R.; PELEGRINE, D. H.; GASPARETO, C.A. Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*mangífera indica* L-Keitt). Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.24, n.1, p.039-042, jan.-mar, 2004.

VIDAL, J. R. M.; SIERAKOWSKI, M. R.; HAMINIUK, C. W. I., MASSON, M. L. Propriedades reológicas da polpa de manga (*Mangifera indica* L. Cv. *Keitt*) centrifugada. Ciência agrotécnica, Lavras, v. 30, n. 5, p. 955-960, set.-out., 2006.

VIEIRA, J. A. G.; CARTAPATTI-STUCHI, G. A. S. Efeito do tamanho das partículas e da tensão aplicada sobre a condutividade elétrica e o tempo de descongelamento do suco de manga. Sitientibus, Feira de Santana, n.35, p.99-109, jul.-dez. 2006.

VILALBA, F. A., Fragmentação mecânica de amêndoas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) por meio de um beneficiador de cilindros. Campinas, Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2003.

VILLARÁN, E. C.; IBARZ, F. J. L. Estudio de la influencia de la temperatura en el comportamiento reológico de mermeladas de albaricoque (*Prunus armeniaca*), arándano (*Vaccinium myrtillus*) y escaramujo (*Rosa canina*). Disponível em <http://fst.sagepub.com>. Acessado em: 29 de janeiro de 2009.

VRIESMANN, L. C., Polysaccharides from the pulp of cupuassu (*Theobroma grandiflorum*): structural characterization of a pectic fraction. Carbohydrate Polymers, p. 2-4, 2008.

VRIESMANN, L. C.; SILVEIRA, J. L. M.; CARMEN L. DE O.; PETKOWICZ, C. L. O. Chemical and rheological properties of a starch-rich fraction from the pulp of the fruit cupuassu (*Theobroma grandiflorum*). Brazil Materials Science and Engineering C, v.29, p.651-656, 2009.

WALLEVIK, J. E. Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown. Cement and Concrete Research, v.39, p.14-29, 2009.

WEI, Y.P; WANG, C.S.; WU, J.S.B. Flow Properties of Fruit Filling. Food Research International, v. 34, p.377-381, 2001.

ZURITZ, C. A.; PUNTES, E. M.; MATHEY, H. H.; PEREZ, E. H.; GASCON, A.; RUBIO, L. A.; CARULLO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; M.S. CABEZA, M. S. Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. Journal of Food Engineering, v.71, p.143-149, 2005.



## APÊNDICE A

## MÉTODOS DE ANÁLISE

### **pH – Método Potenciométrico n° 4.7.2 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).**

O pH pode ser medido por dois processos: o colorimétrico e o eletrométrico. A determinação colorimétrica emprega indicadores coloridos ou papel de filtro impregnado com corantes que mudam de cor em função da concentração hidrogeniônica (pH). Este processo permite apenas medir aproximadamente o pH e não é aplicado às soluções coloridas ou muito turvas ou soluções absoventes, dando resultados falsos. A determinação eletrométrica baseia-se na determinação da concentração hidrogeniônica (pH), usando o potenciômetro. Este processo é mais preciso, exige a calibração do aparelho com soluções padrão e aplica-se para todos os casos, inclusive para soluções coloridas ou turvas.

#### Aparelhagem

- Potenciômetro com divisão na escala de, no mínimo 0,1 unidade.

#### Material

- Béquero de 50 ml

#### Reagentes

- Solução-tampão pH 4,0

- Solução-tampão pH 7,0

#### Procedimento

- Calibrar o potenciômetro com as duas soluções-tampão, a 20°C. Imergir o eletrodo no béquer que contém a amostra e fazer a leitura a 20°C. Caso a amostra seja sólida, dissolver em água.

#### Resultado

- A leitura do pH é feita diretamente.

### **ACIDEZ TOTAL – Método acidimétrico da A.O.A.C, nº 942.15B (HELDRICH, 1990).**

A acidez fixa e volátil, em uma bebida não-alcoólica é resultante dos ácidos orgânicos do próprio alimento, dos adicionados intencionalmente durante o processamento e daqueles resultantes das alterações químicas do produto. Portanto a determinação da acidez total pode fornecer dados valiosos na apreciação do processamento e do estado de conservação da bebida. Os métodos que avaliam a acidez total resumem-se em titular com solução padronizada de álcali, a acidez de bebida não-alcoólica, empregando a fenoftaleína como indicador do ponto final da titulação. O potenciômetro pode ser usado na titulação, até que a solução atinja 8,1, que é o ponto de viragem da fenoftaleína.

#### Material

- Pipeta volumétrica de 10 ml;
- Bureta de 25 ml com divisões de 0,1 ml;
- Erlenmeyer de 250 ml ou béquer de 150 ml.

#### Reagentes

- Solução de hidróxido de sódio 0,1N;
- Solução de fenoftaleína a 1% em álcool etílico, neutralizada com hidróxido de sódio até cor ligeiramente rosa.

#### Procedimento

Pipetar 10 ml (ou quantidades convenientes) da amostra em erlenmeyer (ou béquer) e juntar 90 ml de água destilada.

Titular com solução de hidróxido de sódio até coloração rosa empregando 2 ou 3 gotas de fenoftaleína.

#### Cálculos e resultados

$$\text{g de ácido cítrico anidro/100ml} = \frac{\text{l de NaOH} \times \text{N} \times 64 \times 100}{\text{ml de amostra}}$$

Onde: N = a normalidade da solução de NaOH

64 = equivalente-grama do ácido cítrico anidro

#### Expressão do resultado

Geralmente é expresso em g de ácido cítrico anidro/100ml. Quando o ácido predominante é conhecido, o resultado deve ser expresso em g de ácido/100ml.

Assim expressar em: g/100ml ou g/100g.

## **BRIX – Método refratométrico n°13.6.1 do INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1985).**

O teor de sólidos solúveis em bebidas não-alcoólicas é dado pela leitura refratométrica ou o correspondente grau BRIX. Normalmente a leitura é feita a 20°C.

### Aparelhagem

- Refratômetro com escala de graus BRIX e divisões de, no mínimo 0,2°C.

### Procedimento

Colocar uma ou duas gotas da amostra entre os prismas do refratômetro, esperar um minuto e fazer a leitura.

### Cálculos

- Caso a leitura seja feita a 20°C e a acidez total da amostra for inferior a 1%, o valor do Brix, é a leitura direta.
- Caso a leitura refratométrica seja feita em temperatura diferente de 20°C, anotar a temperatura e fazer a correção do Brix em função da acidez total, com auxílio de uma tabela.
- Caso o produto tenha teor de acidez total igual ou superior a 1%, fazer a correção do Brix em função da acidez total, com auxílio de uma tabela.

### Expressão do resultado

- Expressar em graus Brix.

## **açúcares redutores – Método glicídios redutores em glicose da A.O.A.C., nº 958.06 (ARLINGTON, 1995).**

Os métodos de redução resumem-se em pesar ou titular a quantidade de óxido de Cu I precipitado de uma solução de íons de Cu II por um volume conhecido da solução de glicídios ou medir o volume da solução de glicídios necessário para reduzir completamente um volume conhecido da solução de cobre II. Os resultados são calculados mediante fatores e, geralmente, as determinações de glicídios redutores são calculadas em glicose e as dos não-redutores em sacarose. O presente método determina o teor de açúcares redutores em bebidas não-alcoólicas.

### Aparelhagem

- Balança analítica;
- Chapa de aquecimento;
- Banho-maria.

### Material

- Balões volumétricos de 100 e 250ml;
- Erlenmeyers de 250 ml;
- Funil de vidro;
- Papel de filtro;
- Kitassato;
- Pipetas volumétricas de 5, 20 e 25 ml;
- Dessecador;
- Bureta de 10 e 25ml.

### Reagentes

- Solução A de Fehling: dissolver 34,634g de sulfato de cobre pentahidratado em água, transferi para balão volumétrico de 500 ml, adicionar 0,5ml de ácido sulfúrico concentrado e completar o volume;
- Solução B de Fehling: dissolver 172,0 g de tartarato de sódio e potássio e 50g de hidróxido de sódio em água, transferi para balão volumétrico de 500 ml e completar o volume.

### Procedimento

Pese 2 a 5 g da amostra em um béquer de 100 mL. Transfira para um balão volumétrico de 100 mL com o auxílio de água. Qualquer que seja a característica da amostra (a, b ou c), proceda como a seguir. Complete o volume e agite. Filtre se necessário em papel de filtro seco e receba filtrado em frasco erlenmeyer de 250 mL. Transfira o filtrado para a bureta. Coloque num balão de fundo chato de 250 mL, com auxílio de pipetas de 10 mL, cada uma das soluções de Fehling A e B, adicionando 40 mL de água. Aqueça até ebulição. Adicione, às gotas, a solução da bureta sobre a solução do balão em

ebulição, agitando sempre, até que esta solução passe de azul a incolor (no fundo do balão deverá ficar um resíduo vermelho de  $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

#### Cálculo

$$\text{Glicídeos redutores em glicores} = \frac{100 \times A \times a}{P \times V}$$

A = nº de mL da solução de P g da amostra

a = nº de g de glicose correspondente a 10 mL das soluções de Fehling

P = massa da amostra em g

V = nº de mL da solução da amostra gasto na titulação .

#### Expressão m/m

## **CINZAS – Método A.O.A.C n° 940.26 (HELDRICH, 1990)**

A cinza dos alimentos é o resíduo inorgânico remanescente da queima da matéria orgânica. A cinza obtida não corresponde necessariamente à mesma composição da substância mineral presente no alimento em si, isso devido às perdas por volatilização ou mesmo pela interação entre os componentes minerais.

Teor muito alto de cinzas indica a presença de adulterantes e é recomendável determinar também os componentes insolúveis em ácido.

O método baseia-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.

### Aparelhagem

- Mufla;
- Balança analítica.

### Material

- Dessecador;
- Cadinho de porcelana ou de platina de 30 ml.

### Procedimento

- Pesar 10,0000g de amostra em cadinho previamente tarado e colocar em banho-maria até secagem a secagem, caso a amostra tenha alto teor de umidade. Carbonizar completamente em bico de Bunsen e colocar na mufla a 525°C até completa incineração. A amostra deverá ficar totalmente isenta de carvão, devendo apresentar coloração branca ou acinzentada, Deixar esfriar em dessecador e pesar.

### Cálculo

$$\% \text{ de cinzas} = \frac{\text{g de cinzas} \times 100}{\text{g de amostrar}}$$

### Expressão do resultado

g/100g

## **PECTINA – Método de Carré & Haynes (PEARSON, 1976).**

Presentes em pequenas quantidades em relação a outras substâncias que ocorrem nas paredes celulares, as pectinas são comuns a todas as paredes e também estão presentes nas camadas intercelulares. Constituem cerca de 1 a 4 % dos polissacarídeos das paredes celulares embora sejam mais abundantes em tecidos especializados de determinadas plantas, assim a casca de frutas cítricas contém 30% de pectina, polpa de maçã 15% e a casca de cebola de 11 a 12%.

Duas propriedades das pectinas merecem atenção: a capacidade de formação de gel e a atração iônica. A capacidade de formação de gel depende em primeiro lugar, da estrutura que forma o ácido poligalacturônico. Os ésteres metílicos dos ácidos urônicos são um dos fatores mais importantes para a geleificação das pectinas.

O método baseia-se na neutralização das cargas dos resíduos de ácidos urônicos livres pelos íons cálcio, provocando a geleificação da pectina e sua precipitação.

### Aparelhagem

- Balança analítica;
- Banho-maria;
- Estufa.

### Material

- Balões volumétricos de 100, 500 e 1000ml;
- Béquer de 800 ml;
- Erlenmeyer de 500 ml;
- Placas de alumínio;
- Dessecador;
- Funil de vidro;
- Papel de filtro.

### Reagentes

- Ácido acético-solução aproximadamente 1N: diluir 30ml de ácido acético glacial p.a. a 500 ml com água destilada;
- Cloreto de cálcio- solução aproximadamente 2N: dissolver 55g de cloreto de cálcio anidro em água destilada e diluir para 500ml;
- Solução de nitrato de prata a 1%: dissolver 1 g de nitrato de prata em água destilada e diluir a 100ml;
- Solução de hidróxido de sódio 1N.

