

**ALANA DE LIRA GONÇALVES**

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE POLPA DE CAJÁ (*Spondia  
lutea* L.) A BAIXAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Curso  
de Pós-graduação em Engenharia  
Agrícola da Universidade Federal  
da Paraíba, em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau  
de Mestre.

**Orientadores:**

**Prof. Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata**

**Prof. Dra. Maria Elita Duarte Braga**

Campina Grande – PB

Setembro – 2000



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



Centro de Ciências  
e Tecnologia

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

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE POLPA DE CAJÁ**  
**(*Spondia lutea* L.) A BAIXAS TEMPERATURAS**

**ALANA DE LIRA GONÇALVES**

**Campina Grande - Paraíba**  
**Setembro de 2000**

---



G635p      Gonçalves, Alana de Lira  
                Propriedades termofísicas de polpa de caixa (*Spondia lutea* L.) a baixas temperaturas / Alana de Lira Gonçalves.  
                - Campina Grande, 2000.  
                71 f.

                Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -  
                Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e  
                Tecnologia.

                1. Propriedades Termofísicas - Polpa de Caixa 2.  
                Congelamento - Polpa de Caixa 3. Polpa de Caixa -  
                Caracterizações Químicas 4. Dissertação I. Mata, Mario  
                Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti II. Braga, Maria Elita  
                Duarte III. Universidade Federal da Paraíba - Campina  
                Grande (PB) IV. Título

CDU 66.045.263.442(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA

ALANA DE LIRA GONÇALVES

Titulo: "Propriedades Termofísicas de Polpa de Cajá (*Spondia lutea* L.) a Baixas Temperaturas".

ANCA EXAMINADORA

PARECER

Mário Eduardo R.M.C. Mata  
Prof. Dr. Mário Eduardo R.M.C. Mata-Orientador

APROVADA

Maria Elita Duarte Braga  
Prof. Dra. Maria Elita Duarte Braga-Orientadora

APROVADA

Rossana M. F. de Figueiredo  
Prof. Dra. Rossana M. F. de Figueiredo-Examinadora

APROVADA

Odélsia Leonor S. de Azevedo  
Prof. Dra. Odélsia Leonor S. de Azevedo-Examinadora

APROVADA

AGOSTO/2000

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus Padrinhos **Galego e Geracina**.

Aos meus irmãos, **Artur, aliana e Líbia**.

A meus Pais **Gonçalo e Marinete** (in memória).

A Tia **Eba**.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo na vida.

A minha família e a Netinho pelo carinho apoio e incentivo constante;

A CAPES pela concessão de bolsa;

Aos professores orientadores, Dr. Mario Eduardo e a Dra. Maria Elita, pelo apoio, orientação e amizade durante a realização deste trabalho;

As professoras, Dra. Odelsia e Dra. Rossana pelas correções e sugestões que muito contribuíram para este trabalho;

Aos professores deste curso;

Aos colegas do curso em especial a Michel, Alessandra e Nelson;

A secretária do curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola Rivanilda pelo carinho e amizade estabelecida;

Aos funcionários do Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas;

A todos que contribuíram na realização deste trabalho.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Cajá</b>	<b>3</b>
2.1.1. Origem e importância	3
2.1.2. Aspectos botânicos	3
<b>2.2. Características químicas</b>	<b>3</b>
2.2.1. pH	3
2.2.2. Acidez	4
2.2.3. Sólidos solúveis totais (°Brix)	4
2.2.3. Relação °Brix /Acidez	5
2.2.4. Umidade	5
<b>2.3. Modelo matemático para refrigeração de alimentos</b>	<b>6</b>
2.3.1. Resfriamento de formas regulares	6
2.3.2. Resfriamento unidirecional. placa plana	7
2.3.3. Resfriamento em mais de uma direção	8
2.3.4. Extensão a formas irregulares	9
2.3.5. Aquecimento e resfriamento de alimentos em estado estacionário	10
2.3.6. Resistência interna desprezível para transferência de calor	11

2.3.7.	Resistência de superfície desprezível para transferência de calor	12
2.3.8	Superfície finita e resistência interna para transferência de calor	13
2.4.	Propriedades termofísicas	14
2.4.1.	Massa específica	15
2.4.2.	Calor específico	18
2.4.3.	Difusividade térmica	22
2.4.4.	Condutividade térmica	24
2.4.5.	Determinação simultânea da condutividade e difusividade térmica	27
3.	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1.	Características químicas	29
3.1.1.	pH	29
3.1.2.	Acidez	29
3.1.3.	Sólidos solúveis (°Brix)	29
3.1.4	Umidade	30
3.2.	Propriedades termofísicas	30
3.2.1	Massa específica	30
3.2.2.	Calor específico	30
	3.2.2.1. Metodologia proposta por MOLINE (1961)	30
	3.2.2.2. Método das misturas	31
	3.2.2.2.1. Capacidade calorífica do calorímetro	32
	3.2.2.2.2. Calor específico da polpa de cajá (método das misturas)	32

3.2.3.	Difusividade térmica	33
3.2.4.	Condutividade térmica	34
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1.	Caracterização da polpa de cajá	35
4.2.	Propriedades termofísicas	35
4.2.1.	Massa específica	35
4.2.2.	Calor específico	37
4.2.3.	Difusividade térmica	46
4.2.4.	Condutividade térmica	50
5.	CONCLUÇÕES	53
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
7.	ANEXOS	60
7.1.	Anexo 1	60
7.2.	Anexo 2	61
7.3.	Anexo 3	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Aparelho para determinação do calor específico pela metodologia proposta por (MOLINE <i>et al.</i> , 1961).	31
Figura 3.2	Calorímetro utilizado para determinação do calor específico da polpa de cajá pelo método das misturas.	32
Figura 3.3	Aparelho para determinação da difusividade térmica	33
Figura 4.1	Massa específica da polpa de cajá em função de temperaturas negativas	37
Figura 4.2	Variação da temperatura da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico	38
Figura 4.3	Variação da temperatura do gelo em função do tempo para determinação do calor específico da polpa de cajá	38
Figura 4.4	Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-180°C).	39
Figura 4.5	Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-100°C).	39
Figura 4.6	Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-70°C).	40
Figura 4.7	Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-35°C).	40
Figura 4.8	Valores de calor específico da polpa de cajá determinados experimentalmente pelo método das misturas.	46
Figura 4.9	Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de 0°C	47
Figura 4.10	Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de -18°C	47

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 4.11</b>	<b>Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de -70°C</b>	<b>48</b>
<b>Figura 4.12</b>	<b>Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de -100°C</b>	<b>48</b>
<b>Figura 4.13</b>	<b>Difusividade térmica da polpa de cajá em função de temperaturas negativas</b>	<b>50</b>
<b>Figura 4.14</b>	<b>Valores de condutividade térmica para polpa de cajá.</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características químicas e rendimento do cajá	6
Tabela 3.1	Equações propostas por SIEBEL (1982) para determinação do calor específico	33
Tabela 4.1	Caracterização da polpa de cajá	35
Tabela 4.2	Valores de massa específica para polpa de cajá	36
Tabela 4.3	Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada até $-180^{\circ}\text{C}$ .	41
Tabela 4.4	Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada até $-100^{\circ}\text{C}$	41
Tabela 4.5	Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada até $-70^{\circ}\text{C}$	42
Tabela 4.6	Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada até $-35^{\circ}\text{C}$	42
Tabela 4.7	Valores de calor específico para o gelo calculados pela equação de FENNEMA & POWRIE (1964) e determinados experimentalmente pelo método das misturas e para polpa de cajá determinados pelo método das misturas	44
Tabela 4.8	Valores de calor específico para polpa de cajá calculados pelos modelos de SIEBEL (1982).	45
Tabela 4.9	Difusividade térmica da polpa de cajá	49
Tabela 4.10	Valores de condutividade térmica da polpa de cajá para temperaturas abaixo do ponto de congelamento.	51

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a polpa de cajá e determinar algumas de suas propriedades termofísicas tais com massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica para temperaturas abaixo do ponto de congelamento. A caracterização da polpa foi feita determinando-se o pH, sólidos solúveis totais, acidez titulável e umidade. A massa específica foi obtida pela razão entre a massa e o volume, congelando-se as amostras de polpa em um recipiente de volume conhecido às temperaturas de 0, -18, -35, -70, -100 e -180°C. O Calor específico abaixo do ponto de congelamento foi medido pela metodologia proposta por MOLINE *et al.* (1961), às temperaturas de -35, -70, -100 e -180°C e pelo método das misturas às temperaturas de -18, -35, -70, -100, -180 e -196°C. A difusividade térmica foi determinada às temperaturas de 0, -18, -35, -70 e -100°C, utilizando-se a metodologia proposta por DICKERSON (1965), a condutividade térmica foi calculada pelo produto entre a massa específica, calor específico e a difusividade térmica. Foram utilizados alguns modelos da literatura, baseados no conteúdo de água, para o cálculo do calor específico, os valores obtidos foram comparados aos experimentais. Diante dos resultados obtidos para polpa de cajá conclui-se que: a) Os valores médios de pH, sólidos solúveis, acidez titulável e umidade foram em média de 4,16, 8,10 °Brix, 1,23% e 90,06% (base úmida) respectivamente; b) A massa específica diminui de 1025 a 986 kg/m<sup>3</sup> com a diminuição da temperatura de 0°C para -180°C, descrevendo uma curva exponencial; c) O calor específico obtido usando-se a metodologia proposta por MOLINE *et al.* (1961) varia de 2,79 kJ/kg°C a 3,81 kJ/kg°C para uma variação de temperatura de -35 a -180 °C, estando esses valores acima dos reportados na literatura e dos obtidos pelo método das misturas; d) O calor específico da polpa de cajá, obtido pelo método das misturas, variou de 1,96 kJ/kg°C a 0,72 kJ/kg°C para uma variação de temperatura de -18 a -196°C respectivamente, descrevendo uma equação linear, e) A difusividade térmica e a condutividade térmica aumentam com a diminuição da temperatura onde se encontrou valores de difusividade térmica de  $6,41 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s a  $8,83 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s para uma variação de temperatura de 0°C a -100°C. A condutividade térmica variou de 1,43 W/m°C a 1,71 W/m°C para temperaturas de -18 a -100°C.

## ABSTRACT

This work consists in characterizing the pulp of yellow monbin fruit and in determining some of its thermophysical properties, such as specific bulk and heat, and thermal diffusibility, and conduction, for those temperatures which are below freezing point. The characterization of the yellow monbin pulp was accomplished by determining some aspects, namely, pH, total soluble solids, acidity and moisture. The specific bulk was obtained through the ratio between bulk and volume when freezing the samples of pulp in a known volume bin at 0, -18, -35, -70, -100 and -180°C temperatures. The specific heat below freezing point was measured by using Moline's method (MOLINE *et al.*, 1961) at temperatures of -35, -70, -100 and -180°C, and also the mixture method at -18, -35, -70, -100, -180 and -196°C. The thermal diffusibility was determined at the temperatures of 0, -18, -35, -70 and -100°C, using Dicherson's methodology (DICHERSON, 1965). The thermal conduction was measured by the yield between specific bulk, specific heat and thermal diffusibility. Some models from the literature, based on the water content for specific heat measurements, were used. The resulting values were compared with the experimental ones. From the results regarding the study on the pulp of yellow monbin, the following conclusions were drawn: (a) the average values of pH, soluble solids, acidity and moisture were approximately 4,16 pH, 8, 18° Brix, 1,23% and 90,06% (wet base), respectively; (b) the specific bulk decreased from 1025 to 986 kg/m<sup>3</sup>, together with a decrease in temperature from 0°C to -180°C, describing an exponential curve; (c) the specific heat obtained through Molines's methodology (MOLINE *et al.*, 1961) ranged from 2,78 kJ/kg°C to 3,81kJ/kg°C for a temperature range of -35 to -180°C. These values are higher than those reported by the literature, and also than the ones obtained from the mixture method; (d) the specific heat in the yellow monbin pulp, obtained thorough the mixture method, ranged from 1,96 kJ/kg°C to 0,72 kJ/kg°C, achieving a temperature range from -18 to -196°C, respectively, thus describing a linear equation; (e) the thermal diffusibility and conduction increased as temperature decreased where thermal diffusibility values of  $6,41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $8,83^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  were found for a temperature range of 0 -100°C. The thermal conduction ranged from 1,43 w/m°C, for temperatures ranging from -18 to -100°C.

## 1. INTRODUÇÃO

A cajazeira (*Spondia lutea* L.) é uma árvore originária das Américas da família das Anacardiáceas, que pode atingir mais de vinte metros de altura (GOMES, 1989). Segundo CAVALCANTE (1983) o fruto da cajazeira é uma drupa elipsóide de 3 a 4 cm de comprimento, casca lisa de cor amarela alaranjado, polpa escassa sucosa, doce acidulada e possui sabor e cheiro acentuados.

O cajá é um fruto explorado extrativamente principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, no entanto não existem dados na literatura dos volumes de produção, pois poucos são os pomares comerciais. Contudo, baseado na grande aceitação desse fruto a cultura vem se expandindo, criando expectativas favoráveis ao seu consumo "*in natura*" e para sua industrialização, já que a sua aceitação nos mercados consumidores é crescente.

A produção do cajá é sazonal e na região Nordeste ocorre por um período de aproximadamente 3 meses durante o ano (março, abril e maio), sendo que a sua comercialização, durante esse período, é feita com o fruto "*in natura*" e ocorre principalmente nas Centrais de Abastecimento (Ceasas) e no mercado informal.

Para a grande maioria da população, o cajá é comprado "*in natura*" para ser consumido na forma de suco, no entanto para o setor da indústria de alimentos o cajá "*in natura*" é utilizado na fabricação de polpa, suco industrial, compota, geleia e sorvete.

Como no setor Agroindustrial é importante a distribuição de um produto ao longo do ano, e devido à alta perecibilidade do cajá, torna-se importante o seu processamento na forma de polpa. Contudo para a preservação desse produto este deve ser congelado com a finalidade de conservar suas características físico-químicas, e evitar o desenvolvimento de microorganismos indesejáveis, possibilitando a sua utilização ao longo do ano.

Durante o processamento da polpa de cajá alguns componentes voláteis, que confere aroma e sabor característico, podem ser perdidos, necessitando portanto, que tanto o processamento quanto o seu congelamento sejam rápidos.

O congelamento rápido tem como objetivo aprisionar os componentes voláteis, permitindo manter um produto de qualidade. No entanto, para o congelamento do produto, dimensionamento de equipamentos e otimização de processos torna-se necessário o conhecimento das propriedades termofísicas como massa específica, calor específico,

difusividade térmica e condutividade térmica, que nem sempre estão disponíveis na literatura, para baixas temperaturas, principalmente para temperaturas criogênicas.

Diante do exposto os objetivos deste trabalho foram:

- Caracterizar a polpa de cajá quanto ao pH, acidez titulável e sólidos solúveis
- Determinar a massa específica, calor específico, difusividade térmica e condutividade térmica da polpa de cajá às temperaturas de -18, -35, -70, -100 e -180°C.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Cajá

#### 2.1.1 Origem e importância

A cajazeira é originária da América, e vem sendo usada de modo acentuado na indústria alimentícia, sua polpa ácida de sabor e cheiro apreciáveis é rica em sais minerais, como cálcio, fósforo e ferro, sendo utilizada na fabricação de sucos, compotas, geléias e sorvetes. A cultura vem expandindo-se com perspectivas favoráveis já que sua aceitação nos mercados consumidores é cada vez maior. No Brasil sua importância econômica vem crescendo acentuadamente, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, sem, contudo haver dados do volume de produção (GOMES, 1989).

#### 2.1.2. Aspectos botânicos

É uma árvore pertencente ao gênero *Spondias* da família das Anacardiáceas, podendo atingir mais de vinte metros de altura. Apresenta folhas compostas de até 30 cm de comprimento, possui de 7 a 17 folíolos oblongos ou ovalados lanceolados, serrados e opostos. As flores são branco- amareladas (SANTOS, 1978).

O cajá é uma drupa elipsóide de 3-4 cm de comprimento, casca lisa, cor amarelo alaranjada, polpa escassa, sucosa, doce-acidulada, possui sabor e cheiro apreciáveis CAVALCANTE (1972). A polpa ácida, às vezes doce, é muito utilizada para produção de geléias, compotas, refrescos e sorvetes. Também se faz aguardentes e licores de seu suco (GOMES, 1989).

### 2.2. Características Químicas

#### 2.2.1. pH

O pH mede a acidez das frutas e alimentos, de uma maneira geral. Os alimentos apresentam normalmente pH inferior a 7,0. É o pH que indica o tipo de tratamento necessário para se conservar alimentos. Alimentos com pH acima de 4,5 exigem baixas temperaturas para conservarem-se por serem mais susceptíveis ao desenvolvimento de microorganismos.

Segundo LEITÃO (1980), as frutas e seus derivados geralmente apresentam valores de pH abaixo de 4,5. Isto se deve ao fato de que os ácidos presentes nos alimentos encontram-se, principalmente, na forma molecular e, principalmente, na forma dissociada que é a que apresenta as propriedades ácidas (FAPEP/SINE, 1997).

A concentração de íons hidrogênio (pH) de um alimento é importante pela influência que exerce sobre os tipos de microorganismos aptos à sua multiplicação e, portanto, sobre as alterações que, logicamente deveriam produzir (GAVA, 1979).

### **2.2.2. Acidez**

A acidez total (fixa e volátil) em alimentos é resultante dos ácidos orgânicos do próprio alimento, dos adicionados intencionalmente durante o processamento e daqueles resultantes de alterações químicas do produto. Portanto, a determinação da acidez total pode fornecer dados valiosos na apreciação do processamento e do estado de conservação do alimento (CARVALHO, 1990).

O teor de acidez aumenta com o crescimento da fruta, até que ocorra o seu desenvolvimento fisiológico completo. Chama-se acidez orgânica total, a soma de todos os ácidos orgânicos livres e os sais. Através de reações químicas ocorre a oxidação dos ácidos orgânicos com produção de gás carbônico e água (BLEINROTH, 1988).

A acidez é calculada com base no principal ácido presente, expressando-se o resultado como percentagem de acidez titulável. A acidez titulável é determinada por titulação com solução de hidróxido de sódio. Os frutos perdem a acidez rapidamente com a maturação (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

### **2.2.3. Sólidos solúveis totais (°Brix)**

Os sólidos solúveis totais representam a percentagem, em gramas, de sólidos que se encontram dissolvidos no suco ou polpa. No caso de frutas, esses sólidos aquo-solúveis são constituídos por: açúcares (65 a 85% dos sólidos dissolvidos), ácidos orgânicos, sais minerais, vitamina C e do complexo B e outras substâncias aquo-solúveis (FAPEP/SINE, 1997).

A quantidade de sólidos solúveis totais é utilizada como um parâmetro da concentração de polpa da fruta além de dar a idéia do estado de maturação da fruta. Em

frutas, os sólidos solúveis indicam o teor de açúcar já que esta participa na sua composição, em alguns casos, com até 80% dos sólidos solúveis. Com o amadurecimento da fruta, o amido é hidrolisado em açúcares complexos e os açúcares complexos em simples, com isso o teor de sólidos solúveis das frutas vai se elevando, sendo possível considerar os sólidos solúveis como índice de maturação de frutas (CARVALHO *et al.*, 1990)

#### **2.2.4 Relação °Brix /Acidez**

A relação °Brix / Acidez é considerada como uma das melhores formas de avaliar o sabor, sendo mais representativo que a medição isolada de açúcares ou da acidez. Representa a relação de equilíbrio entre esses dois componentes porém, deve-se especificar o teor mínimo de sólidos e o máximo de acidez, para se ter uma idéia real do sabor (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

#### **2.2.5. Umidade**

A água é o maior componente dos frutos, perfazendo um total de 80 até 95% de sua composição. O conteúdo de água é bastante variável entre as espécies e depende do suprimento dado ao tecido, à época da colheita, bem como, da temperatura e umidade relativa do meio (CHITARRA, 1994).

A temperatura e a umidade influenciam diretamente na intensidade respiratória das frutas tropicais após a colheita. Pode interferir na velocidade da reação dos processos metabólicos, no tempo de armazenamento e até causar distúrbios fisiológicos (SIGRIST, 1988).

Na Tabela 2.1 encontram-se as principais características químicas do cajá determinadas por MORORÓ (1998).

**Tabela 2.1:** Características químicas e rendimento do cajá

Rendimento (%)	45-50
PH	2,4-2,8
°Brix	8,4-13,5
Sólidos totais (%)	9,2-12,4
Cinzas (%)	0,4-0,6
Acidez (%)	0,9-1,7
Açúcares totais	6,9-12,1
Ácido ascórbico (mg/100g)	24,2-31,8

Fonte: MORORÓ (1998)

### 2.3. Modelo matemático para refrigeração de alimentos

#### 2.3.1. Resfriamento de formas regulares

A maioria dos alimentos a ser resfriado possui formas características que não são regulares, mas sempre é possível uma semelhança com formas de geometrias regulares. Também é certo que muitos alimentos não são uniformes possuindo composições distintas, portanto possuem termopropriedades específicas para cada um. Assim, é possível resolver o problema mediante o uso de propriedades efetivas que permitam considerar o produto com um conteúdo uniformemente distribuído (CALVELO, 1986)

A equação diferencial que governa a transferência de calor sem mudança de fase em estado não estacionário é:

$$\rho.Cp \frac{T}{t} = \nabla K . \nabla T \quad (2.1)$$

onde:

$\rho$  = massa específica do material, kg. m<sup>-3</sup>

$C_p$  = calor específico,  $\text{kg.kj}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$K$  = condutividade térmica,  $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

Esta equação é válida para qualquer tipo de geometria, apresenta soluções analíticas para geometrias simples (placa plana, cilindro, esfera e paralelepípedo) no caso de condições iniciais e de contorno que simulam a imersão de um sólido de temperatura uniforme em um meio de temperatura distinta (CALVELO, 1986)

### 2.3.2. Resfriamento unidirecional. Placa plana

Considere uma placa de dimensões tais que o fluxo calórico seja unidirecional na direção  $x$ . Supondo que essa placa esta a uma temperatura inicial  $T_i$  e que no instante  $t=0$  ela é submersa em um meio fluido a uma temperatura distinta  $T_f$  e ainda colocando-se a origem das coordenadas em um plano de simetria da lamina, a expressão resultante, para este caso, pode ser representado pela Equação 2.2.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica definida como  $\alpha = k / \rho C_p$ . e  $k$  é independente de  $x$  e  $y$ .

Neste caso, a Equação 2.2 deve ser resolvida com as seguintes condições iniciais e de contorno:

Para

$$t \leq 0 \quad T = T_i \quad \text{em} \quad -\ell \leq x \leq \ell \quad (2.3)$$

E para:

$$x = \pm \ell \quad k \frac{\partial T}{\partial x} = \pm h (T - T_f) \quad \text{a.} \quad t > 0$$

$$x = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

Para facilitar o uso da solução da Equação 2.2 com as coordenadas 2.3 e 2.4, convém definir as seguintes variáveis adimensionais como:

$$t^* = \frac{\alpha \cdot t}{\ell^2}, \quad x^* = \frac{x}{\ell}, \quad T^* = \frac{T_f - T}{T_f - T_i} \quad (2.5)$$

Conseqüentemente as Equações 2.2 e 2.3 mudam:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} \quad (2.6)$$

$$t^* \leq 0 \quad T^* = 1 \quad \ell \leq x^* \leq \ell \quad (2.7)$$

$$x^* = \mp \ell \quad \frac{dT}{dx} = \pm Bi \cdot T^* \quad t^* > 0 \quad (2.8)$$

Onde o número de Biot é definido como  $Bi = h \cdot \ell / k$ , e  $\ell$  é metade da espessura da placa.

### 2.3.3. Resfriamento em mais de uma direção

Existem casos em que as dimensões do produto a resfriar impedem sua assimilação em algum dos sistemas unidirecionais, assim é freqüente encontrar geometrias cúbicas, paralelepípedos, cilindros finitos em que o fluxo calórico é bi e tridimensional. Qualquer problema cartesiano tridimensional  $T(x, y, z \text{ e } t)$  ou cilíndrico bidimensional  $T(r, z \text{ e } t)$  sujeito a uma equação diferencial e condições de contorno homogêneas, pode expressar-se como o produto de problemas transitórios unidirecionais sempre e quando sua condição inicial é uma constante, ou é expressa na forma de um produto de funções em cada uma das variáveis (CALVELO, 1986).

Assim por exemplo, a solução para a temperatura adimensional em um paralelepípedo de dimensões  $D \times W \times L$  pode ser obtida mediante o produto da temperatura adimensional de três placas planas infinitas de dimensões  $D$ ,  $W$  e  $L$ , respectivamente.

em que,

$$T^* = (x^*, y^*, z^*, t^*) = T^*_x(x^*, t^*) \cdot T^*_y(x^*, t^*) \cdot T^*_z(z^*, t^*) \quad (2.9)$$

Analogamente, a solução para um cilindro finito pode ser obtida como o produto da solução para uma placa infinita e a de um cilindro infinitamente longo.

A regra de Newman permite calcular tempos de resfriamento em sistemas com condução em mais de uma direção. Assim por exemplo, o cálculo do tempo para se alcançar uma certa temperatura  $T_r$  no centro de um cubo de temperatura inicial  $T_i$ , submerso num meio de temperatura  $T_f$ , permite calcular  $T^*$  (CALVELO, 1986).

$$T^* = \frac{T_r - T_f}{T_i - T_f} \quad (2.10)$$

E para um cubo é:

$$T^* = (T_X^*)^3 \quad (2.11)$$

A solução para a placa infinita será:

$$T_X^* = (T^*)^{1/3} \quad (2.12)$$

Utilizando o número de Biot correspondente é possível calcular  $t^*$  e daí o tempo de resfriamento.

Quando se trata de um paralelepípedo ou de um cilindro infinito, o cálculo se realiza por prova e erro, propondo-se tempos e calculando-se a temperatura no centro por meio da equação 2.9.

#### 2.3.4. Extensão a formas irregulares

Para produtos com formas irregulares a solução da Equação 2.1 deve realizar-se numericamente, adotando-se o sistema de coordenadas que mais facilite a sua execução, ou por meio de equações simplificadas, que com parâmetros semi-empíricos permitam a correspondente predição. Existem várias propostas nesta última linha, e parece ser difícil compatibilizar simplicidade com precisão e amplitude de aplicação. Um dos métodos

mais recentes invoca a utilização do número de dimensões de transferência de calor equivalentes EHTD (Equivalent Heat Transfer Dimensions) (CALVELO, 1986).

As soluções exatas para formas regulares de resfriamento unidirecional têm a seguinte forma geral:

$$T^* = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n t^*) \quad (2.13)$$

em que,

$$A_n = f(\text{Bi, geometria, posição})$$

e

$$B_n = f(\text{Bi, geometria})$$

### 2.3.5. Aquecimento e resfriamento de alimentos em estado estacionário

Segundo SINGH (1992), é vital saber a mudança de temperatura com o tempo durante o regime de estado não estacionário para aquecer ou esfriar um produto. Como exemplo pode-se citar os processos que envolvem esterilização de alimentos, onde o histórico da temperatura durante o aquecimento devem ser conhecidos de forma que o efeito letal do processo térmico na população microbiana possa ser determinado com precisão.

A equação de transferência de calor para estado não estacionário é:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left( \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} \right) \quad (2.14)$$

em que,

T= temperatura, °C

t = tempo, s

$\alpha$  = difusividade térmica, m

x,y,z = coordenadas retangulares.

Antes da solução da equação é necessário determinar a importância relativa da resistência interna oposta à resistência externa na transferência de calor. Para este propósito o número de Biot,  $N_{Bi}$ , é importante, este é dado pela Equação 2.15

$$N_{Bi} = \frac{hD}{k} = \frac{D/k}{1/h} = \frac{\text{resistencia interna}}{\text{resistencia externa}} \quad (2.15)$$

Um número de Biot alto (maior que 40) insinua resistência interna alta para transferência de calor (igual há condensação de vapor na superfície do objeto). Um número de Biot baixo (menor que 0,2) indica que o produto tem resistência interna muito pequena para transferência de calor, isto é, a condutividade térmica do objeto é alta.

Entre o número de Biot de 0,2 e 40 existe uma taxa finita de transferência de calor do interior até à superfície do objeto, quer seja quando o produto sofre aquecimento ou esfriando.

Expressões matemáticas úteis para o cálculo de temperatura, para os três casos acima são apresentadas a seguir.

### 2.3.6. Resistência interna desprezível para transferência de calor

A relação de temperatura dimensional pode ser expressa com a seguinte equação exponencial:

$$\frac{T - T_m}{T_0 - T_m} = \exp\left(\frac{-hA_i}{\rho C p V} t\right) \quad (2.16)$$

em que,

$T$  = temperatura, °C

$T_m$  = temperatura média (°C)

$T_0$  = temperatura (°C)

$h$  = coeficiente de transferência convectiva,  $J \cdot s^{-1} \cdot m^2 \cdot K$

$\rho$  = massa específica,  $kg/m^3$

$C_p$  = calor específico, kJ/kg°C

$A_i$  = área, m<sup>2</sup>

$V$  = volume, m<sup>3</sup>

$t$  = tempo, s

Em uma forma completamente adimensional,

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \exp(-N_{Bi}N_{Fo}) \quad (2.17)$$

em que,

$N_{Fo}$  = número de Fourier

$N_{Bi}$  = número de Biot

### 2.3.7. Resistência de superfície desprezível para transferência de calor

A equação básica 2.14 pode ser resolvida analiticamente com condições iniciais e de contorno apropriada para obtendo-se as soluções seguintes.

Em coordenadas retangulares,

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n-1} \cos \frac{\mu_n r}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.18)$$

Onde  $R$  é metade da espessura da placa e  $r$  é a distância variável do eixo central.

$$\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \quad (2.19)$$

Em coordenadas cilíndricas.

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0 \frac{\mu_n r}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.20)$$

onde  $R$  é o raio do cilindro e  $r$  é a distância variável do eixo central.

$$J_0(\mu_n) = 0 \quad (2.21)$$

Em coordenadas esféricas,

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} 2(-1)^{n-1} \frac{R}{r\mu_n} \sin \frac{\mu_n r}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.22)$$

onde R é o raio da esfera e r é a distância variável do eixo central.

$$\mu_n = \mu\pi \quad (2.23)$$

### 2.3.8. Superfície finita e resistência interna para transferência de calor

Semelhante ao caso anterior, a Equação 2.14 foi resolvida analiticamente onde encontrou-se as soluções seguintes para temperatura.

Em coordenadas retangulares,

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos \frac{\mu_n r}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.24)$$

onde R é a espessura da placa e r é a distância variável do eixo central

$$\mu_n \tan \mu_n = \frac{hR}{k} \quad (2.25)$$

Em coordenadas cilíndricas,

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)} J_0 \frac{\mu_n r}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.26)$$

onde R é o raio do cilindro e r é a distância variável do eixo central.

$$J_0(\mu_n) = 0 \quad (2.27)$$

Em coordenadas esféricas

$$\frac{T - T_m}{T_o - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} \frac{R}{r\mu_n} \sin \frac{r\mu_n}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}\right) \quad (2.28)$$

onde R é o raio da esfera e, r é a distância variável do eixo central.

$$\mu_n \cot \mu_n = 1 - \frac{hR}{k} \quad (2.29)$$

De acordo com SINGH (1992), o uso de soluções analíticas, para determinar dados de temperatura, é incômodo por causa da necessidade de se avaliar numerosas condições da série, desta forma essas soluções foram reduzidas a cartas que são muito fáceis de usar e foram feitas para placa infinita, cilindro infinito e esfera.

#### 2.4. Propriedades térmofísicas

A utilização do frio na conservação de alimentos, por diversos períodos de tempo, iniciou-se em termos empíricos há mais de mil anos. A partir deste passado e do desenvolvimento de diversas ciências tais como a física, a química, a microbiologia, entre outras, é que se pode encontrar uma explicação científica e satisfatória para os efeitos benéficos do frio como agente de preservação (KASAHARA, 1986).

No resfriamento rápido, a alta velocidade do ar não aumenta a perda de água do produto, por que esta ocorre apenas enquanto o produto está sendo esfriado. Porém o armazenamento a frio desidrata os produtos por conta da alta velocidade do ar e pelo longo período de exposição ao mesmo, sendo assim ideal a alta umidade relativa do ar para evitar a desidratação dos produtos hortifrutícolas, no entanto se for por curtos períodos a umidade relativa do ar não é muito importante. Sendo assim, devemos considerar o resfriamento e o armazenamento como operações distintas, de requisitos diferentes (FRUPEX, 1995).

A grande dependência entre as reações químicas e a temperatura do sistema é estabelecida, em termos gerais, na velocidade de ocorrência de uma reação, que é duplicada a cada incremento de 10°C da temperatura do sistema. Em função disso os processos de alteração em alimentos ocorrem com uma certa dependência da temperatura. Outro aspecto importante é que, de uma forma geral, os alimentos possuem grande quantidade de água favorecendo a mobilização das moléculas e conseqüentemente a ocorrência de reações deteriorativas. Também é certo que à medida que a água passa de líquida para sólida há uma maior estabilidade do alimento congelado reduzindo sua condição de água livre (KASAHARA, 1986).

O processo de congelamento produz uma grande mudança nas propriedades térmicas dos alimentos provocadas pela perda de água e o efeito da mudança de fase (SINGH & HELDMAN, 1997).

LEVIS (1993) afirma que os alimentos em geral são maus condutores de calor, e por isso o processo de transferência de calor, em que a condução é o mecanismo predominante, é lento. O mesmo autor relata que o aquecimento e resfriamento podem acontecer mediante operações de redução de tamanho.

Segundo PASQUALENE & MASTANDREA (1995), as propriedades térmicas de alimentos podem ser consideradas praticamente constantes à temperaturas maiores do que o ponto de congelamento, por outro lado em temperaturas abaixo desse ponto, as propriedades mudam drasticamente devido à formação de gelo, o qual tem propriedades claramente diferentes da água. De acordo com SINGH & HELDMAN (1997), quando a água dentro do produto passa do estado líquido para o estado sólido, ocorre também uma mudança de fase gradual nas propriedades como: densidade, condutividade térmica, entalpia e calor específico.

As equações necessárias para o cálculo da taxa de aquecimento ou resfriamento podem ser utilizadas, mas seu emprego tem sido restringido pela falta de valores tabelados das propriedades térmicas do produto. Baseado em muitos anos de pesquisa foram desenvolvidas técnicas especiais para interpretar os dados de aquecimento e resfriamento utilizados extensivamente para alimentos embalados ou enlatados. Apesar da natureza experimental, tais técnicas estão ligadas à teoria de transferência de calor (NEVES FILHO, 1991).

#### **2.4.1. Massa específica**

A massa específica de um alimento é a massa da amostra dividida pelo seu volume. Para sua determinação experimental usa-se o picnômetro de comparação de ar e também o método da balança de plataforma SINGH (1992). Dentre alguns modelos matemáticos de massa específica ou densidade para alimentos e mais especificamente para sucos de frutas, RIEDEL (1951) e CHOI & OKOS (1986) sugerem a determinação da massa específica desses sucos utilizando um modelo em função do índice de refração ( $n_s$ ) do suco, com erro de cerca de 2%. O modelo utilizado é:

$$\rho = \left[ \left( \frac{s^2 - 1}{s^2 + 2} \right) \cdot \left( \frac{62,4}{0,206} \right) \right] \cdot 16,0185 \quad (2.30)$$

onde

$\rho$  = massa específica,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$s$  = índice de refração

Usando a informação composicional de alimentos líquidos CHOI & OKOS (1986) sugerem também a equação seguinte:

$$\rho = \frac{1}{\sum (X_i^w / \rho_i)} \quad (2.31)$$

$X_i^w$  = teor do componente

$\rho_i$  = massa específica do gelo,  $\text{kg}/\text{m}^3$

➤ ALVARADO & ROMERO (1989) utilizando sucos e polpas de frutas, a diferentes concentrações e temperatura, desenvolveram uma equação para o cálculo da massa específica onde a mais simples é baseada apenas no teor de sólidos solúveis ( $^{\circ}\text{Brix}$ ), com um coeficiente de correlação de 0,995.

$$\rho = 996 + 4,17B \quad (2.32)$$

onde

$B$  = sólidos solúveis totais,  $^{\circ}\text{Brix}$

O valor de  $B$  está limitado entre 5 e 30%.

Uma outra equação baseada no teor de sólidos solúveis e na temperatura, com coeficiente de correção de 0,982 é representada pela Equação 2.33.

$$\rho = ((1002 + 4.61B) - 0.460T + 7.00110^{-3}BT^2 - 9.17510^{-5}T^3) \quad (2.33)$$

Limitações

( $T$ : 0 - 80 $^{\circ}\text{C}$ ,  $X_w$ : 20 - 95.2%)

Kubota *et al.* citado por CHOI & OKOS (1986) desenvolveram um modelo para determinar a massa específica de solução de açúcar para teores de sólidos solúveis na faixa de 0 a 30% e temperatura entre 10 e 50°C.

$$\rho = 1098 + 4,26 X_s - 0,049(T + 273) \quad (2.34)$$

A massa específica no ponto de congelamento é medida através do método da gravidade específica desenvolvido por Casimir *et al.* citado por KASAHARA *et al.* (1986) e aperfeiçoado por CARDENAS & GONZALEZ (1979), o qual é expresso por meio da seguinte equação:

$$G.E = \frac{(D - S)}{(H - S)(N - D)} \quad (2.35)$$

G.E= gravidade específica

D= peso do recipiente com a mostra, kg

S= peso do recipiente, kg

H= peso do recipiente com água, kg

N= peso do recipiente com água + amostra, kg

Uma vez determinada a gravidade específica determina-se a massa específica pela seguinte expressão.

$$\rho = G.E \times \rho_u \quad (2.36)$$

onde

$\rho_u$  = massa específica da água descongelada, kg/m<sup>3</sup>

A massa específica do produto para temperatura abaixo do ponto de congelamento pode ser determinada pela fórmula de Hsieh *et al.* que permite calcular esta propriedade e se conhecer as frações mássicas da água congelada, da água não congelada e de sólidos, através da equação abaixo (KASAHARA *et al.*, 1986)

$$\frac{1}{\rho} = \frac{X_u}{\rho_u} + \frac{X_s}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_s} \quad (2.37)$$

$\rho$  = massa específica,  $\text{kg.m}^{-3}$

$\rho_u$  = massa específica da água descongelada,  $\text{kg.m}^{-3}$

#### 2.4.2. Calor Específico

De acordo com MONSENIN (1980), nos processos de transferência de calor, a que os materiais biológicos são submetidos, a variação de pressão é muito pequena. Portanto, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante.

KAZARIN & HALL (1965), têm reconhecido a dificuldade de se medir o calor específico de materiais biológicos devido ao conteúdo de umidade do material e ao calor de absorção. Devido a estas dificuldades é que poucos valores de calor específico estão disponíveis na literatura.

Muitos métodos, utilizados para determinar o calor específico, baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre um primeiro corpo, que se pretende determinar o calor específico, e um segundo corpo de calor específico conhecido.

Em processos nos quais ocorre uma mudança de fase, como por exemplo, o congelamento, se utiliza o calor específico aparente. Este se obtém somando-se o calor sensível e o calor latente (SINGH & HELDMAN, 1997).

Quando a água é congelada, o calor específico se reduz drasticamente, pois a água tem um calor específico muito mais baixo que a maioria dos constituintes alimentícios e o calor específico dos alimentos é significativamente afetado pela quantidade de água presente e pelo estado físico desta água. Os alimentos congelados com alto conteúdo de água têm valores de calor específico aproximadamente a metade daquele obtido em seu estado fresco. Assim, é necessário uma menor energia para reduzir a temperatura do alimento de  $-1^{\circ}\text{C}$  a  $-30^{\circ}\text{C}$  do que a que se necessita para passar de  $-28^{\circ}\text{C}$  a  $-1^{\circ}\text{C}$  (muitos alimentos congelam ao redor de  $-1^{\circ}\text{C}$ ) (LEWIS, 1993). O calor específico pode ser experimentalmente determinado através de vários métodos, incluindo

o método das misturas, método de placa quente protegida, e usando o calorímetro diferencial de varredura (CHOI & OKOS, 1986).

Para alimentos de umidade alta, sobre o ponto de congelamento, SIEBEL (1982) desenvolveu a equação seguinte:

$$C_p = 0.837 + 3.349X_w \quad (2.38)$$

$C_p$  = calor específico

$X_w$  = teor de umidade

Uma equação semelhante também foi sugerida por DICKERSON (1968) para alimentos de alta-umidade. CHARM (1971) sugeriu o modelo seguinte:

$$C_p = 2.093X_1 + 1.256X_s + 4.187X_w \quad (2.39)$$

$X_w$  = teor de umidade

$X_s$  = fração sólida

Usando uma aproximação semelhante, CHOI & OKOS (1986) sugeriram o modelo seguinte para calor específico em alimentos líquidos.

$$C_p = \sum C_{p_i} X_i^* \quad (2.40)$$

$C_{p_i}$  = calor específico do gelo,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$X_i^*$  = teor de cada componente

A metodologia do calorímetro diferencial de varredura é baseada na proporcionalidade entre o fluxo de calor da amostra e o calor específico instantâneo, quando este está sujeito a um programa linear de aumento de temperatura. Através do registro deste fluxo de calor em função da temperatura, e comparando com o fluxo de calor de um material de referência submetido às mesmas condições, o calor específico pode ser obtido em função da temperatura. Para validar este método o autor determinou o calor específico de vários compostos conhecidos tais como o diamante, o grafite e o nitrato de prata e os comparou com os valores da literatura (O NEILL, 1966).

A técnica do calorímetro diferencial de varredura é utilizada por muitos pesquisadores da área de alimentos por ser rápida, direta e necessitar somente de miligramas de amostra (SIMÕES, 1997).

O calorímetro diferencial de varredura foi utilizado por alguns autores para determinação de algumas propriedades associadas ao congelamento. SERENO (1994) usou o calorímetro diferencial de varredura em uma faixa de temperatura de  $-60$  a  $40^{\circ}\text{C}$ , para determinar o calor específico aparente, a temperatura inicial de fusão a temperatura de fusão, a entalpia de fusão e a fração de água não congelada de pêra, maçã e tomate, os quais apresentaram um desvio menor que 5% quando comparado com dados da literatura e WANG & KOLBE (1991) também usou o calorímetro diferencial de varredura para determinação do calor específico aparente, o teor de água não congelada e a entalpia de polpa de peixe, em uma faixa de temperatura  $-80$  a  $40^{\circ}\text{C}$  utilizando uma taxa de aquecimento de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

O método proposto por MOLINE (1961), para determinar o calor específico abaixo do ponto de congelamento consiste de um bloco retangular de poliestireno, com cavidade central onde se coloca um cilindro de inox com uma amostra, sendo o calor específico obtido através da equação seguinte::

$$C_p = \frac{M_i C_{p_i} \frac{dT}{d\theta_i} - M_a C_a \frac{dT}{d\theta_p}}{M_p \frac{dT}{d\theta_p}} \quad (2.41)$$

onde:

$C_p$  = Calor específico do produto,  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$M_i$  = massa do gelo, kg

$C_{p_i}$  = calor específico do gelo,  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$M_a$  = massa do cilindro, kg

$C_a$  = calor específico do inox,  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$M_p$  = massa do produto, kg

O calor específico do gelo utilizado para o cálculo do calor específico pode ser determinado pela equação proposta por (RELDMAN & SINGH, 1981).

$$C_{p_i} = 2,053 + 0,005T - 2,596 \times 10^{-4} T^3 \quad (2.42)$$

$C_{p_i}$  = calor específico do gelo,  $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

$T$  = temperatura,  $\text{°C}$

No método das misturas o produto com massa e temperatura conhecida é colocado em um calorímetro, contendo água cuja massa, temperatura e calor específico são também conhecidos. O calor específico do produto é calculado pela equação de balanço de calor entre o calor ganho ou perdido pelo calorímetro e a água, e aquele calor absorvido ou perdido pelo produto (MOHNSENIN, 1980).

$$C_1 m_1 T_1 - T_2 + C_{cal} T_1 - T_3 = C_2 m_2 T_3 - T_2 \quad (2.43)$$

$C_1 = C_2$  = calor específico da água,  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$m_1$  = massa de água à temperatura ambiente, kg

$m_2$  = massa de água à temperatura fria (abaixo da temperatura ambiente), kg

$T_1$  = temperatura da água à temperatura ambiente, K

$T_2$  = temperatura da água fria, K

$T_3$  = temperatura de equilíbrio da água, K

$C_{cal}$  = capacidade calorífica do calorímetro,  $\text{J.K}^{-1}$

$$m_{1+2} T_3 - T_5 + C_{cal} T_3 - T_5 = m_3 C_p T_4 - T_5 + m_3 L_f \quad (2.44)$$

$m_{1+2}$  = massa de água a temperatura de equilíbrio ( $T_3$ ), kg

$m_3$  = massa do produto, kg

$C_p$  = calor específico do produto,  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$T_4$  = temperatura do produto, K

$T_s$  = temperatura de equilíbrio final da mistura, K

$L_f$  = calor latente de fusão do gelo (a 0°C), J.kg<sup>-1</sup>

### 2.4.3. Difusividade térmica

Os primeiros trabalhos de determinação da condutividade térmica em frutas e hortaliças, foram realizados com produtos de forma semelhantes a uma esfera.

BHOWMIK & HAYAKAWA (1979) afirmam que a difusividade térmica é necessária na determinação das curvas de temperatura de alimentos durante processos de transferência de calor para a delimitação dos próprios procedimentos usados nestas operações.

Em situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente, a difusividade térmica é a propriedade mais usada, sendo definida como a razão entre a capacidade de transferir calor e a capacidade de armazenar calor (SINGH, 1982).

Quando um processo de transferência ocorre em condição de regime transiente, a propriedade térmica que requer especial importância é a difusividade térmica,  $\alpha$ , este parâmetro nos permite, por uma parte, estabelecer a rapidez com que o calor se difunde em um material quando este é aquecido ou esfriado e também, conhecer o grau de dependência que existe, para um dado local no produto, entre a temperatura e o tempo (KASAHARA, 1986). A difusividade térmica pode ser definida utilizando-se a Equação 2.45

Segundo NEVES FILHO (1991), há duas formas gerais de se obter experimentalmente a difusividade térmica de um produto: calculando-a por meio da Equação 2.45, onde a difusividade térmica “ $\alpha$ ” é definida como a relação entre a condutividade térmica e o calor do produto multiplicado por sua densidade ou medindo-a diretamente.

$$\alpha = \frac{K}{\rho.C_p} \quad (2.45)$$

onde:

$\alpha$  = difusividade térmica,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$K$  = condutividade térmica,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$\rho$  = massa específica do produto,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$C_p$  = calor específico do produto  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Para se determinar a difusividade térmica é possível recorrer a métodos experimentais, como também a modelos matemáticos.

Dentre os procedimentos experimentais devemos citar o proposto por DICKERSON (1968). Tal procedimento basicamente consiste em introduzir o alimento em um cilindro com alta condutividade térmica, que é submerso em um banho de água termostalizada. A temperatura da água é elevada a uma velocidade constante, sendo registrada a temperatura do centro e da superfície do cilindro com termopares. O mesmo autor propôs que a difusividade térmica pode ser calculada mediante a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_s - T_c)} \quad (2.46)$$

onde

$\alpha$  = difusividade térmica,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$A$  = razão linear de aquecimento,  $\text{K} \cdot \text{min}^{-1}$

$R$  = raio do cilindro,  $\text{m}$

$T_s$  e  $T_c$  = temperatura da superfície e do centro do cilindro, respectivamente,  $\text{K}$

Este procedimento embora aceitável, é recomendado para determinações de difusividade térmica no ponto de congelamento, havendo determinados valores para uma série de produtos alimentícios na faixa de 40-65°C (KASAHARA, 1986).

A difusividade térmica é influenciada fortemente pelo conteúdo de água como mostrado pelos modelos seguintes desenvolvidos por DICKERSON (1968) e Martens citado por SINGH (1992), respectivamente:

$$\alpha = 0.088 \times 10^{-6} + \alpha_w - 0.088 \times 10^{-6} X_w \quad \text{DICKERSON (1968)} \quad (2.47)$$

$\alpha_w$  = difusividade térmica da água,  $\text{m}^2/\text{s}$

$X_w$  = teor de umidade

$$\alpha = 0.057363 X_w + 0.00028 T + 273 \times 10^{-6} \quad \text{Martens citado por SINGH (1992)} \quad (2.48)$$

Baseado na composição de alimentos líquido, CHOI & OKOS (1986) sugeriram o modelo seguinte:

$$\alpha = \sum \alpha_i X_i^v \quad (2.49)$$

$\alpha_i$  = difusividade térmica da água

$X_i^v$  = fração volumétrica

Diversos autores já recorreram à metodologia proposta por DICKERSON (1965) para obter a difusividade térmica. Entre esses autores encontra-se VIEIRA (1996), que obteve a difusividade térmica para suco de laranja em diferentes concentrações de 11 a 65 °Brix e SILVA (1997) que trabalhou com polpa de abacaxi nas concentrações de 15 e 25 °Brix, e encontrou valores de  $1,84 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  e  $1,74 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

SIMÕES (1997), trabalhando com polpa de manga integral, centrifugada, peneirada e concentrada em intervalo de temperatura entre 25 e 50°C obteve valores de difusividade térmica de  $1,41 \pm 0,05$ ;  $1,39 \pm 0,08$ ;  $1,38 \pm 0,03$  e  $1,28 \pm 0,03 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , respectivamente.

#### 2.4.4. Condutividade térmica

Os métodos utilizados para determinar a condutividade térmica são o estacionário e o transiente. Estes métodos consistem em resolver a equação de condução de calor em diferentes geometrias: placas paralelas, cilíndricos concêntricos e esferas concêntricas. MOHSENIN (1980).

Condutividade térmica “k” é a taxa de transferência de calor “q” por unidade de área da seção transversal “A” quando uma diferença de temperatura de unidade ( $T_1 - T_2$ ) é mantida em cima de uma distância L (SINGH, 1992)

$$k = \frac{qL}{A(T_1 - T_2)} \quad (2.50)$$

k= condutividade térmica

q= taxa de transferência de calor

L= comprimento

A= área da seção transversal

T<sub>1</sub>= temperatura na superfície, °C

T<sub>2</sub>= temperatura no centro, °C

A definição acima, que implica em condições de transferência de calor constante, foi usada para determinar condutividade térmica de alimentos. Técnicas de regime transiente também foram usadas para determinação mais rápida da condutividade térmica. Esses métodos experimentais foram revisados por CHOI & OKOS (1986) e REIDY & RIPPEN (1971). Os métodos de estado estacionário incluem o método da placa quente protegida, o método de cilindro concêntrico, e o método de esfera concêntrica. Os métodos transientes incluem o método de Fitch, a fonte linear de calor ou método da sonda, e o método da placa quente. Dados experimentais de condutividade térmica, medidos para vários tipos de alimentos, são expresso por meio de relações matemáticas, sendo esses modelos úteis para o cálculo da condutividade térmica de alimentos. Alguns dos modelos comumente usados foram desenvolvidos por RIEDEL (1982) para prever condutividade térmica de sucos de fruta, soluções de açúcar, e leite. O modelo proposto é:

$$k = 326.58 + 1.0412T - 0.00337T^2 \times 0.46 + 0.54X_{\text{m}} \times 1.73 \times 10^{-3} \quad (2.51)$$

k= condutividade térmica, W/m°C

T= temperatura °C

Estudos mostraram que o modelo representado pela Equação 2.51, quando operado na faixa de temperatura de 0 a 180°C, apresenta erro de 1%.

Suor citado por SINGH (1992) sugeriu a equação 2.52, e obteve por análise de regressão dos dados, a condutividade térmica para várias frutas e legumes.

$$k=0.148+0.00493 \times (X_w) \quad (2.52)$$

A Equação 2.53 deveria prever a condutividade térmica dos valores experimentais para frutas e legumes para teores de umidade superior a 60% com  $\pm 15\%$  de erro. No entanto esse modelo mostrou-se inadequado para produtos com baixa densidade, ou alimentos com espaços praticamente nulos, como a maçã.

CHOI & OKOS (1986) sugeriram o modelo seguinte para alimentos líquidos baseado na sua composição.

$$k = \sum_i k_i X_i^v \quad (2.53)$$

$k_i$  = condutividade térmica da água, W/m°C

$X_i^v$  = fração volumétrica

Onde a fração de volume calculada,

$$X_i^v = X_i^m / \rho_i / \sum X_i^m / \rho_i \quad (2.54)$$

De acordo com SIMÕES (1997) a determinação da condutividade térmica em regime transiente para um corpo cilíndrico pode ser feita através de qualquer montagem que satisfaça as condições de contorno necessárias para uma solução particular da Equação 2.55.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2.55)$$

Que aplicando na Equação 2.14 obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = A = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (2.56)$$

onde A é igual à velocidade constante de aquecimento em todos os pontos do cilindro.

Segundo VIEIRA (1996) e CHOI & OKOS (1986), em materiais biológicos, a condutividade térmica além de variar com o teor de umidade também varia com a concentração de sólidos. Assim esses autores determinaram a variação da condutividade térmica em função do teor de umidade ou da concentração de sólidos.

#### 2.4.5. Determinação simultânea da condutividade e difusividade térmica

NIX *et al.* (1967) demonstraram que o equipamento para medir a condutividade térmica pode ser usado para determinação direta da difusividade térmica se um termopar adicional for colocado na amostra a uma distância radial conhecida, tal que

$0,16 < \beta < 3,1$ . Os primeiros termos da equação abaixo precisam ser calculados para assegurar a convergência

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \left[ \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) - \frac{C_e}{2} \right] \quad (2.57)$$

Em que,

T= temperatura, °C

Q=potência por unidade de crescimento, W/m

K= condutividade térmica, W/m°C

$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha\theta}}$ , adimensional

$C_e$ = constante de Euler, 0,5772157...

VOUDOURIS & HAYAKAWA (1994), também desenvolveram um método de determinação simultânea da difusividade e da condutividade térmica através de uma fonte de calor pontual. Este método foi testado para alimentos diferentes, com bons resultados para condutividade térmica, quando comparados com valores da literatura,

mas para difusividade térmica o método só é eficiente para produtos com alta difusividade térmica. De acordo com os autores, antes do método ser convalidado experimentalmente é necessário um estudo sobre a influência de alguns parâmetros chave para a sonda, como a relação entre o comprimento e o diâmetro, a taxa de geração de calor e o período de teste para a determinação da difusividade e condutividade térmica.

Alguns erros associados aos parâmetros envolvidos na construção da sonda tais como: o tubo da sonda, o sensor de temperatura e o fio aquecedor foram estudados por MURAKAMI *et al.* (1996). Os autores discutiram quais os parâmetros que produzem um menor erro na determinação da condutividade térmica de alimentos.

CHOI & OKOS (1986) determinaram simultaneamente a condutividade e a difusividade térmica do suco de tomate utilizando o método da sonda e NIX, (1967) também determinou estas propriedades para borracha de silicone utilizando a fonte linear de calor.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, Campina Grande – PB.

#### **3.1. Características químicas**

Para este trabalho foram utilizados polpa de cajá adquiridas no comércio local que foram levadas ao setor de análise químicas do Laboratório de Armazenamento onde foram feitas as análises de acidez, sólidos solúveis totais (°Brix), pH e teor de umidade. Todas as determinações foram feitas em triplicata.

Antes do início das determinações as polpas foram descongeladas à temperatura ambiente 23°C ( $\pm$  2°C).

##### **3.1.1. pH**

Antes da determinação do pH, existe a necessidade de calibração do potenciômetro DMpH.2 da Digimed com duas soluções tampão (pH 4,0 e 7,0) a 20°C. Após essa calibração a determinação é feita colocando-se o eletrodo do equipamento em um Becker que contém a amostra de polpa de cajá e a leitura é feita diretamente no equipamento. O resultado é expresso em unidades de pH.

##### **3.1.2. Acidez**

Foi determinada pelo método da AOAC (1980), nº 9.119, descrito no Anexo 1. Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido cítrico.

##### **3.1.3. Sólidos solúveis (°Brix)**

A leitura foi feita utilizando-se um refratômetro manual da marca ATAGO, colocou-se de uma a duas gotas de suco entre os prismas do refratômetro e em seguida realizou-se a leitura direta em °Brix.

### 3.1.4. Umidade

A umidade da polpa de cajá foi determinada em estufa a 70°C até peso constante, seguindo-se as NORMAS DO INSTITUTO ADOLFO LUTZ (1985).

## 3.2. Propriedades termofísicas

O congelamento foi realizado colocando-se o cilindro de aço inoxidável com a polpa de cajá em um Ultra-Kryostat tipo N-180, calibrado para operar de acordo com a temperatura desejada (-18, -35, -70, -100 e -180). A leitura de temperatura da polpa foi realizada de 4 em 4 minutos até a estabilização da temperatura do equipamento com a temperatura da polpa.

### 3.2.1. Massa específica

A massa específica da polpa de cajá foi determinada dividindo-se a massa pelo volume da amostra.

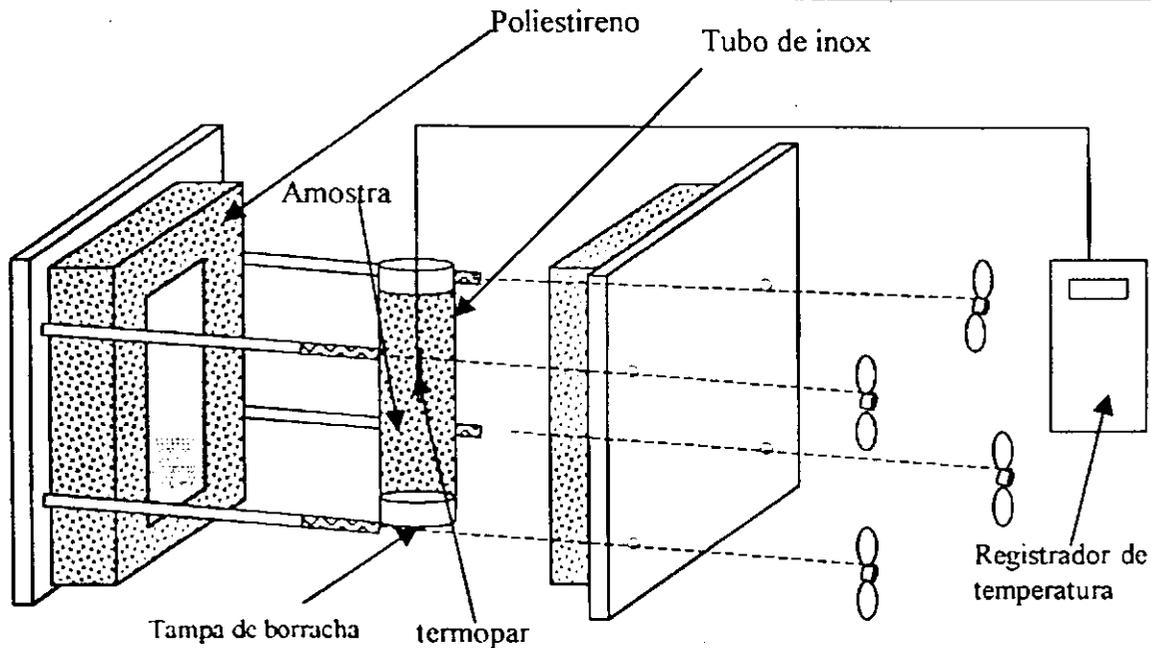
O volume da polpa de cajá foi obtido submetendo-se as amostras as temperaturas desejadas de (0, -18, -35, -70, -100 e -180°C) em um recipiente de volume conhecido. Depois de atingidas as temperaturas determinaram-se as massas das amostras de polpa. A massa específica da polpa de cajá foi determinada dividindo-se a massa do produto pelo volume da amostra ( $\rho = m / v$ ).

### 3.2.2. Calor específico

O calor específico da polpa de cajá foi determinado de acordo com a metodologia proposta por MOLINE *et al.*, (1961) para temperaturas abaixo do ponto de congelamento de um produto e também pelo método das misturas:

#### 3.2.2.1. Metodologia proposta por (MOLINE *et al.*, 1961)

O equipamento é constituído de um bloco de isopor, com uma cavidade onde é colocada uma cápsula cilíndrica de aço inoxidável contendo a amostra de polpa, cujas extremidades foram isoladas com tampo de borracha sintética, como ilustrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** - Aparelho para determinação do calor específico pela metodologia proposta por (MOLINE *et al.*, 1961).

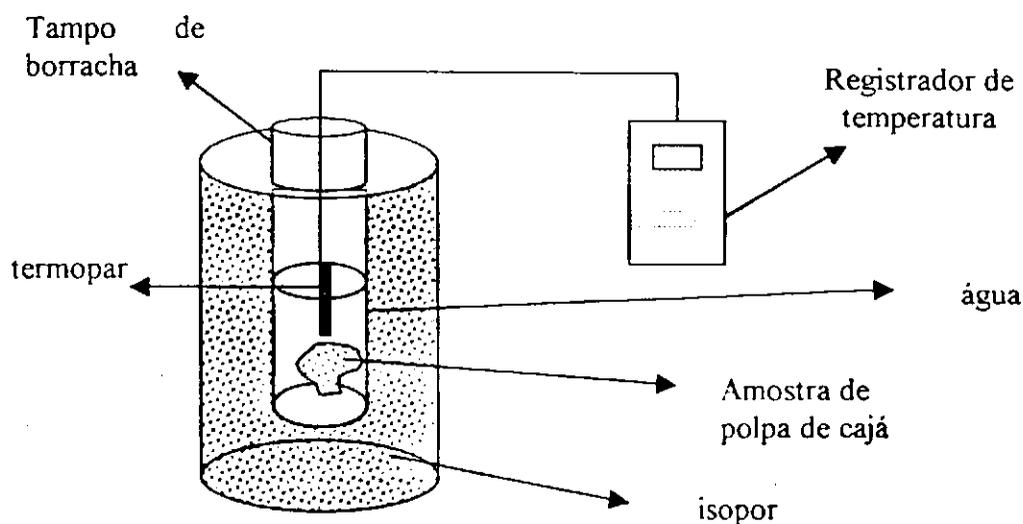
Na câpsula cilíndrica de inox, com tampo inferior de borracha sintética, foi adicionada uma amostra de polpa de cajá à temperatura ambiente. Em seguida foi conectado na parte superior do cilindro outro tampo de borracha sintética, contendo um termopar localizado no centro geométrico da amostra. Esse conjunto foi levado a um aparelho Ultra-Kryostat tipo N-180, para que o mesmo ficasse com uma temperatura de  $-180^{\circ}\text{C}$ . Sendo imediatamente colocado no bloco de isopor retangular à temperatura ambiente. A variação de temperatura no tempo foi registrada de 4 em 4 minutos até  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ . O calor específico foi calculado utilizando-se a Equação 2.41.

Esse procedimento também foi realizado para a polpa de cajá as temperaturas de  $-35$ ,  $-70$  e  $-100^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.2.2. Método das misturas

Nessas determinações, a polpa de cajá foi adicionada em um calorímetro construído com uma garrafa térmica isolada com uma camada de fibra de vidro e posta dentro de um tubo de PVC, contendo aproximadamente 200g de água, com tampo de borracha. Neste sistema foi inserido a um termopar digital para medir a temperatura no interior do

calorímetro, como ilustrado na Figura 3.2. Para determinação do calor específico foi necessário, antes, determinar a capacidade calorífica do calorímetro.



**Figura 3.2** - Calorímetro utilizado para determinação do calor específico da polpa de cajá pelo método das misturas.

#### 3.2.2.2.1. Capacidade calorífica do calorímetro

Para determinar a capacidade calorífica do calorímetro, colocou-se 100g de água destilada, à temperatura ambiente,  $T_1$ , dentro do calorímetro. Em seguida colocou-se mais 100g de água destilada a uma temperatura  $T_2$  de aproximadamente  $2^\circ\text{C}$ . Agitou-se o calorímetro durante um determinado tempo até que se atingiu uma temperatura de equilíbrio,  $T_3$ . Com estes valores determinou-se a capacidade calorífica do calorímetro, pela Equação 2.43.

#### 3.2.2.2.2. Calor específico da polpa de cajá (método das misturas)

De posse da capacidade calorífica do calorímetro e da temperatura de equilíbrio  $T_3$ , foi posta no interior do calorímetro uma amostra de polpa de cajá congelada no nitrogênio líquido à temperatura de  $-196^\circ\text{C}$ ,  $T_4$ . Em seguida agitou-se o equipamento por 10 minutos. Obtendo-se uma nova temperatura de equilíbrio,  $T_5$ . O calor específico da polpa de cajá foi determinado pela Equação 2.44.

Esse procedimento também foi realizado para a polpa de cajá às temperaturas de -18, -35, -70 e -100°C e para o gelo às temperaturas de -18, -35, -70, -100 e -196°C.

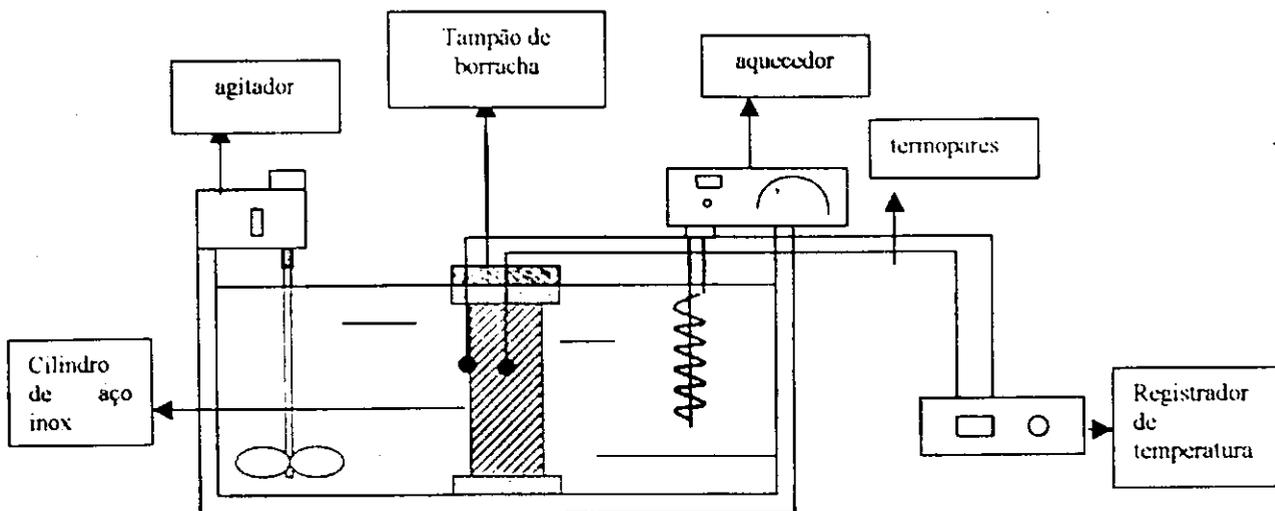
**Tabela 3.1** - Equações propostas por SIEBEL (1982) para determinação do calor específico.

Modelos propostos por (SIEBEL, 1982)	
$C_p=0,837+3,349X_w$	Acima do ponto de congelamento
$C_p=0,008X_w+0,20$	Acima do ponto de congelamento
$C_p=0,003X_w+0,20$	Abaixo do ponto de congelamento

O calor específico também foi determinado pela equação proposta por SIEBEL (1982) que encontra-se na Tabela 3.1.

### 3.2.3. Difusividade térmica

Para determinar a difusividade térmica, utilizou-se a metodologia proposta por DICKERSON (1965), que consiste de uma cápsula cilíndrica de aço inoxidável, acoplada a dois termopares, um indicador de temperatura e um banho com agitador mecânico, como ilustra a Figura 3.3.



**Figura 3.3** - Aparelho para determinação da difusividade térmica.

Em uma cápsula cilíndrica de inox, com tampo inferior de borracha sintética, foi adicionada uma amostra de polpa de cajá à temperatura ambiente. Em seguida foi conectado na parte superior do cilindro um outro tampo de borracha sintética contendo 2 termopares, ficando um localizado no centro geométrico da amostra e outro na parede interna do cilindro. Esse conjunto foi levado a um aparelho Ultra-Kryostat tipo N-180, para que o mesmo ficasse com uma temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$ . Depois de atingida essa temperatura, o conjunto foi transferido para um banho termostaticado com agitador mecânico e aquecido à temperatura de  $\pm 80^{\circ}\text{C}$ .

Com os dados de tempo e temperatura registrados nos dois termopares foi possível determinar os termos da Equação 2.47 proposta por DICHERSON (1965).

Os valores de (A) e  $(T_s - T_c)$  foram obtidos por meio das equações de regressão linear obtidas graficando-se temperatura em função do tempo, construído com os valores experimentais. (A) foi calculado por meio da inclinação média das duas retas  $(T_s)$  e a diferença de temperatura  $(T_s - T_c)$  foi obtida quando as curvas  $(T_s)$  e  $(T_c)$  tornaram-se paralelas.

Esse procedimento também foi realizado para a polpa de cajá às temperaturas de 0, -18, e  $-70^{\circ}\text{C}$ .

#### 3.2.4. Condutividade térmica

A condutividade térmica foi calculada por meio da Equação 2.45, onde ela é proporcional à massa específica do produto, a seu calor específico e a sua difusividade térmica.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Caracterização da polpa de cajá

Dependendo da época, estado de maturação e do local, o cajá pode apresentar uma grande variação na sua composição.

Na Tabela 4.1 encontra-se os valores da caracterização química das amostras da polpa de cajá utilizadas neste trabalho.

**Tabela 4.1** - Caracterização da polpa de cajá

pH	Acidez (%ácido citrico).	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (%)
4,16	1,23	8,10	90,06

Como se observa na Tabela 4.1, os valores de °Brix e Acidez encontram-se de acordo com os valores da literatura MORORO (1998), encontrou valores de °Brix de 8,4 a 13,5, de acidez de 0,9-1,7%, para polpa de cajá. Já para o pH, o valor obtido encontra-se pouco acima do observado pelo autor que foi de 2,4 a 2,8. Este aumento pode ser atribuído às condições edafoclimáticas, que dependendo da época e da região, pode influenciar na composição dos frutos de cajá.

A umidade encontrada experimentalmente para polpa de cajá também foi superior aos dados da literatura obtidos por PROFRUTAS (1997), que encontrou valores para umidade da polpa de cajá de 86,90 %.

### 4.2. Propriedades termofísicas

#### 4.2.1. Massa específica

A massa específica é de grande importância para o dimensionamento e otimização de equipamentos. Mas na literatura praticamente não existe dados de massa específica para frutas e alimentos em geral, à temperaturas abaixo do ponto de congelamento, daí a importância em determiná-los.

Na Tabela 4.2 encontram-se os dados de massa específica para polpa de cajá para temperaturas abaixo do ponto de congelamento e a temperatura de 0°C.

**Tabela 4.2** - Valores de massa específica para polpa de cajá

Temperaturas (°C)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
-180	986
-100	988
-70	994
-35	999
-18	999
0	1025

Na Tabela 4.2 verifica-se que a massa específica da polpa de cajá varia em função da temperatura para valores abaixo do ponto de congelamento, observa-se, ainda na tabela que, de -18°C a -180°C existe uma diminuição da massa específica em torno de 13%. Quando comparamos estes valores com a massa específica a 0°C, nota-se que este valor é maior em torno de 25% e aproxima-se do valor da massa específica à temperatura ambiente, que é de 1045kg/m<sup>3</sup>. Na Figura 4.1 encontra-se a equação que descreve a variação da massa específica em função das temperaturas. Tais resultados estão de acordo com dados encontrados na literatura para polpas de frutas, com conteúdo de umidade semelhante, embora existam poucos trabalhos na literatura sobre massa específica para polpas de frutas, para temperaturas abaixo do ponto de congelamento. KASAHARA *et al.* (1986), determinaram a massa específica para polpa de mamão e de chirimóia para temperaturas abaixo do ponto de congelamento (-18°C) e encontraram valores em torno 893,43 kg/m<sup>3</sup> e 935,2 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

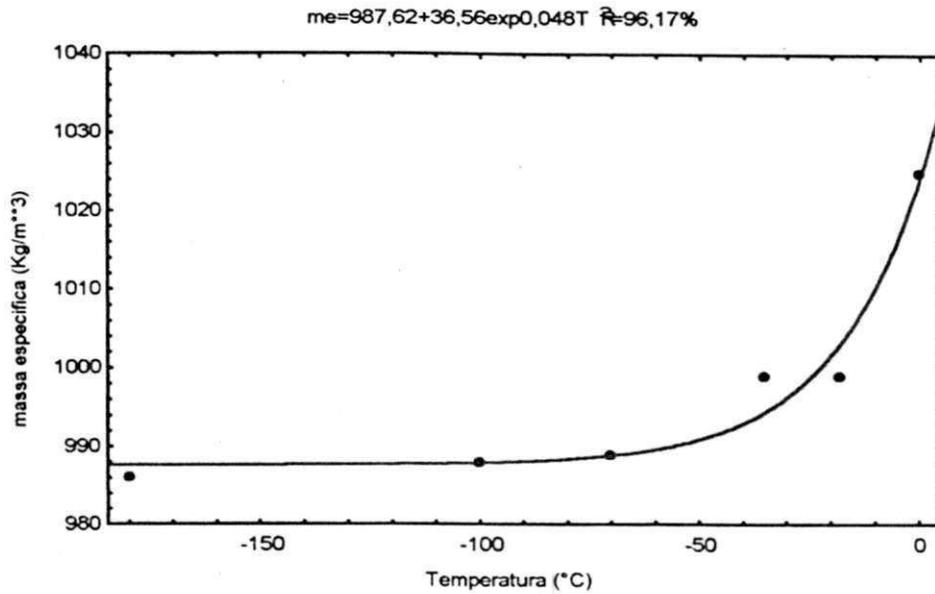
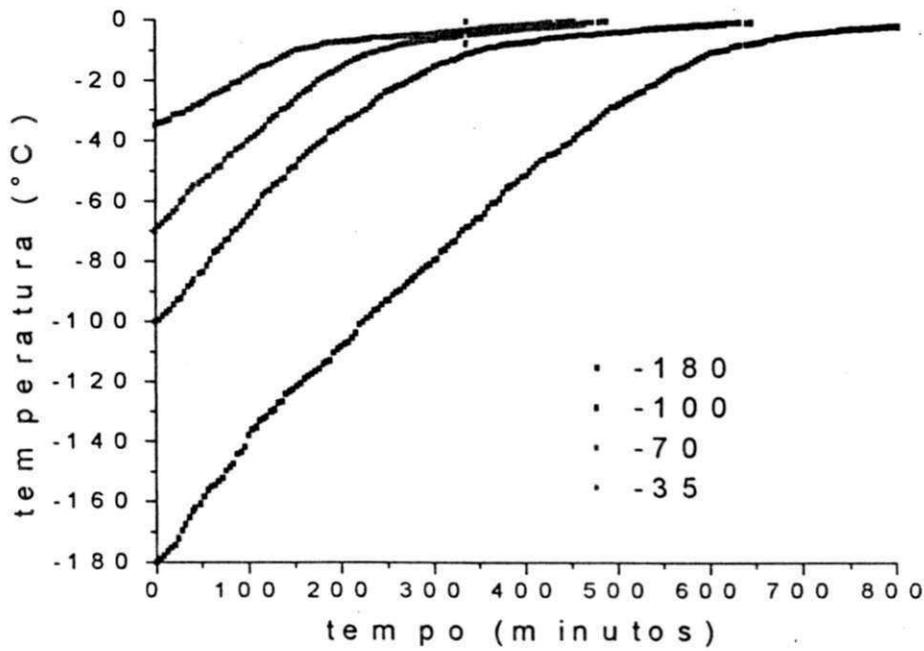


Figura 4.1 - Massa específica da polpa de cajá em função de temperaturas negativas.

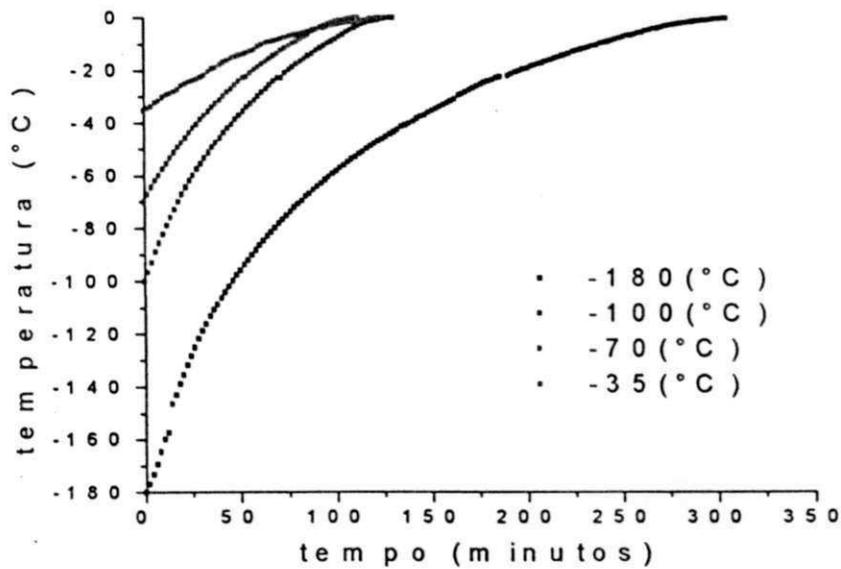
#### 4.2.2. Calor específico

O calor específico, como as demais propriedades termofísicas, também é influenciado pela temperatura abaixo do ponto de congelamento.

Nas Figuras de 4.2 a 4.7 e no Anexo 2, estão os dados de temperatura em função do tempo para o gelo e para a polpa de cajá, usados para determinação do calor específico, abaixo do ponto de congelamento, pela metodologia proposta por MOLINE *et al.* (1961).



**Figura 4.2** - Variação da temperatura da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico.



**Figura 4.3** - Variação da temperatura do gelo em função do tempo para determinação do calor específico da polpa de cajá

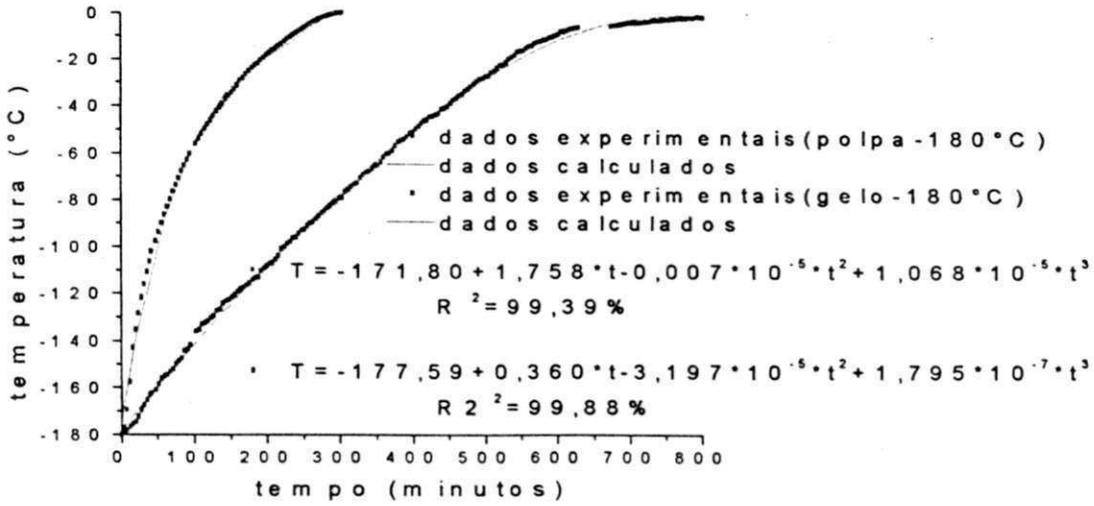


Figura 4.4 - Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-180°C).

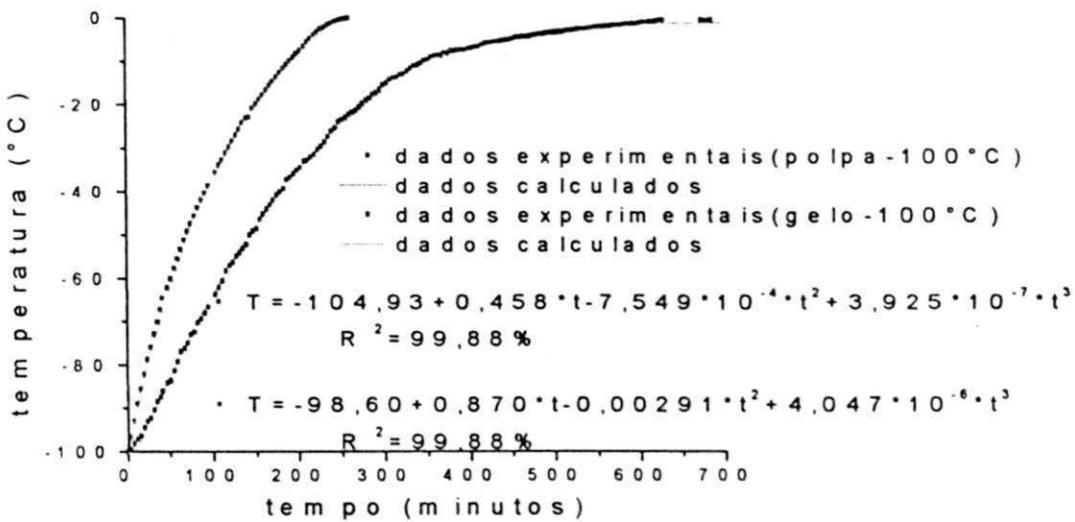
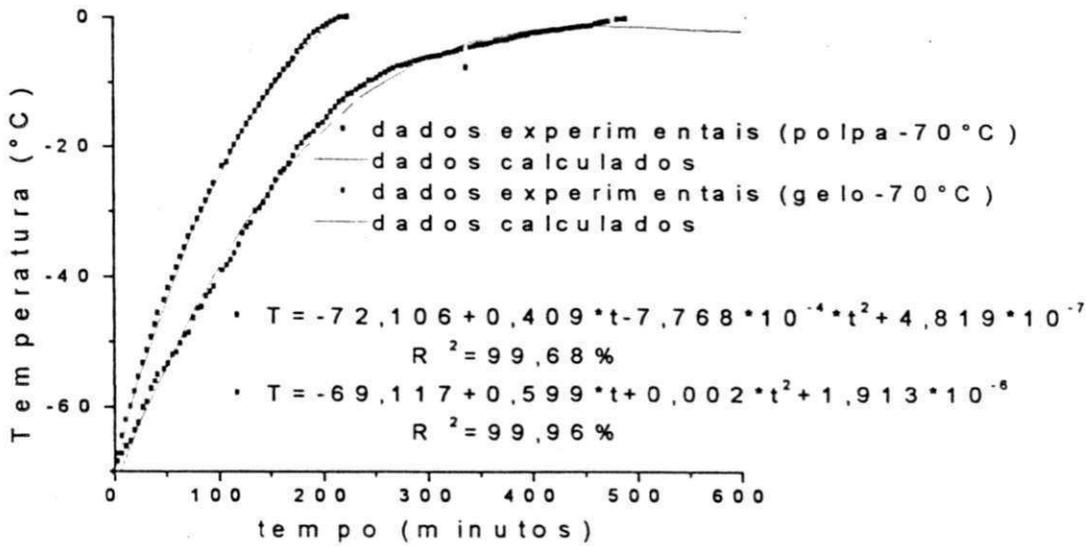
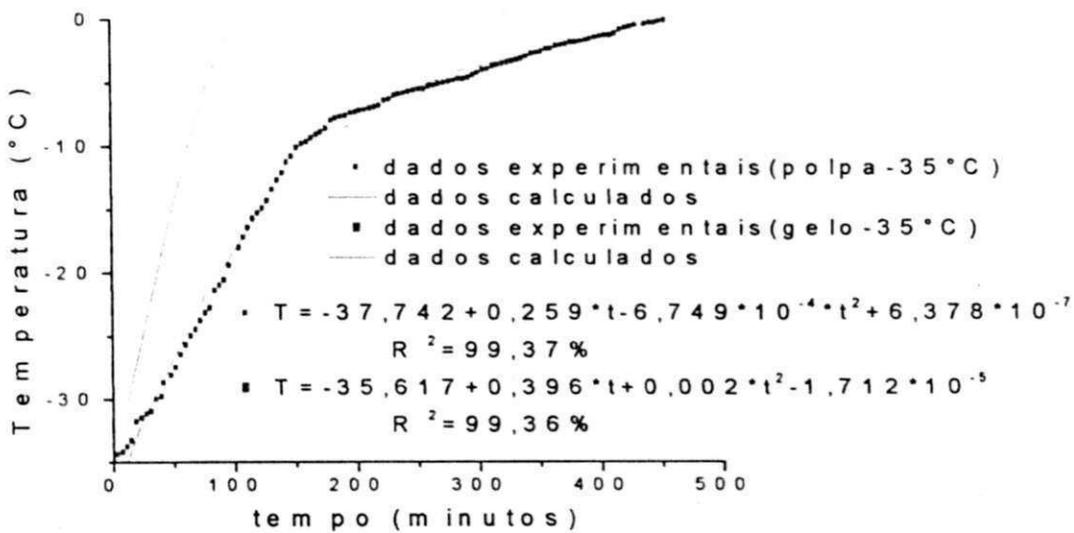


Figura 4.5 - Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-100°C).



**Figura 4.6** - Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-70°C).



**Figura 4.7** - Variação da temperatura do gelo e da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico (-35°C).

Com a variação da temperatura e do tempo das Figuras de 4.2 a 4.7 e o calor específico do gelo, obtido por meio da Equação 2.43, determinou-se o calor específico da polpa de cajá a várias temperaturas. Estes valores encontram-se nas tabelas seguintes de acordo com a temperatura de congelamento.

**Tabela 4.3** - Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada a  $-180^{\circ}\text{C}$

T( $^{\circ}\text{C}$ )	$\theta_i$ (min)	$\theta_p$ (min)	$dT/d\theta_i$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$dT/d\theta_p$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$C_{pi}$ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )	$C_{pp}$ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )
-130	23,54	130,91	0,97	0,34	1,60	2,79
-100	54,17	217,55	0,83	0,29	1,64	2,90
-70	90,15	318,22	0,65	0,23	1,73	3,00
-40	135,95	443,65	0,43	0,15	1,85	3,40
-10	213,75	633,81	0,049	0,016	2,00	4,08
Valor Médio						3,23

**Tabela 4.4** - Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada a  $-100^{\circ}\text{C}$

T( $^{\circ}\text{C}$ )	$\theta_i$ (min)	$\theta_p$ (min)	$dT/d\theta_i$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$dT/d\theta_p$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$C_{pi}$ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )	$C_{pp}$ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )
-88	5,25	31,78	1,28	0,34	1,67	3,64
-70	19,25	83,85	1,12	0,31	1,73	3,75
-52	35,26	143,19	0,93	0,26	1,80	3,89
-34	54,47	214,15	0,70	0,20	1,88	3,99
Valor Médio						3,81

**Tabela 4.5** - Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada a  $-70^{\circ}\text{C}$ 

$T(^{\circ}\text{C})$	$\theta_i$ (min)	$\theta_p$ (min)	$dT/d\theta_i$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$dT/d\theta_p$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$C_{p_i}$ ( $\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	$C_{p_p}$ ( $\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
-50	17,96	61,58	0,89	0,28	1,81	3,50
-42	26,89	90,55	0,81	0,25	1,84	3,66
-34	36,70	122,42	0,72	0,22	1,88	3,81
-26	47,70	158,39	0,62	0,19	1,92	3,89
-18	60,48	200,71	0,49	0,15	1,96	4,00
Valor Médio						3,77

**Tabela 4.6** - Valores para cálculo do calor específico com a polpa de cajá congelada a  $-35^{\circ}\text{C}$ 

$T(^{\circ}\text{C})$	$\theta_i$ (min)	$\theta_p$ (min)	$dT/d\theta_i$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$dT/d\theta_p$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	$C_{p_i}$ ( $\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )	$C_{p_p}$ ( $\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
-26	26,09	52,756	0,30	0,15	1,92	2,19
-22	39,18	79,32	0,28	0,13	1,94	2,47
-18	53,15	109,155	0,26	0,11	1,96	2,85
-14	68,29	142,59	0,24	0,10	1,98	2,94
-10	85,94	180,99	0,19	0,07	2,00	3,51
Valor Médio						2,79

Nas Tabelas 4.3 a 4.6 nota-se uma variação nos valores de calor específico para polpa de cajá em função da temperatura, sendo esses valores superiores aos valores determinados pelo método das misturas, como também aos valores encontrados por outros autores. Observa-se na Tabela 4.6 que só o valor obtido à temperatura de  $-35^{\circ}\text{C}$ , que foi em média de  $2,79 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ , é que está próximo aos valores obtidos por KASAHARA *et al* (1986), que encontraram para polpa de chirimóia e mamão a  $-35^{\circ}\text{C}$ , os valores de  $2,42 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  e  $2,62 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Os valores obtidos neste trabalho para as temperaturas de  $-70$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$  e  $-180^{\circ}\text{C}$  foram em média de  $3,77 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ,  $3,81 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  e  $3,23 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, sendo que esses valores encontram-se acima dos encontrados na literatura para polpa de frutas congelada. MOLINE *et al.* (1961), afirmam que esta variação pode ser atribuída a um aparelho experimental de dimensões superiores, o que influencia diretamente na curva de aquecimento. O mesmo autor também afirma que o incremento de erro se deve, provavelmente, a existência de um gradiente térmico através da amostra.

SIMÕES (1997) determinou o calor específico da polpa de manga congelada ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) e encontrou valores de:  $2,25 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  para polpa concentrada,  $2,36 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  para polpa integral,  $2,49 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  para polpa peneirada e  $2,47 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$  para polpa centrifugada.

Na Tabela 4.7 encontram-se os valores de calor específico, determinados pelo método das misturas, para polpa de cajá, onde se pode observar que estes valores estão de acordo com os valores de calor específico determinados por outros autores para polpa de frutas abaixo do ponto de congelamento.

**Tabela 4.7** - Valores de calor específico para o gelo calculados pela equação de FENNEMA & POWRIE (1964) e determinados experimentalmente pelo método das misturas para o gelo e para a polpa de cajá.

T(°C)	C <sub>p</sub> <sub>i</sub> (kJ/kg°C) equação de (FENNEMA & POWRIE, 1964)	C <sub>p</sub> <sub>i</sub> (kJ/kg°C) determinado experimentalmente	C <sub>p</sub> <sub>p</sub> (kJ/kg°C) determinado experimentalmente	C <sub>p</sub> <sub>p</sub> (kcal/kg°C) determinado experimentalmente
-196	0,79	0,66	0,72	0,17
-180	0,88	0,72	1,13	0,27
-100	1,42	1,13	1,17	0,28
-70	1,58	1,38	1,63	0,38
-35	1,84	1,84	1,92	0,45
-18	1,92	1,89	1,96	0,47

NEVES (1983), determinou o calor específico da polpa de manga com 93% de umidade à temperatura de -18°C e obteve o valor de 1,92 kJ/kg°C. ALVARADO (1989) obteve para o suco de melancia, com umidade de 92,6%, o valor de 1,97 kJ/kg°C.

Quando analisamos os valores de calor específico para polpa de cajá, observa-se que os valores variaram de acordo com a temperatura de congelamento, sendo que esta variação pode ser atribuída ao gradiente de temperatura bem como à formação de cristais de gelo.

**Tabela 4.8** - Valores de calor específico para polpa de cajá calculados pelos modelos de SIEBEL (1982).

Autor	Equações	Calor específico (kJ/kg°C)
(SIEBEL, 1982)	$C_p = 0,837 + 3,349(X_w)$	3,853
(SIEBEL, 1982)	$C_p = 0,008(X_w) + 0,20$	3,851
Abaixo do ponto de congelamento(SIEBEL, 1982)	$C_p = 0,003(X_w) + 0,20$	1,967

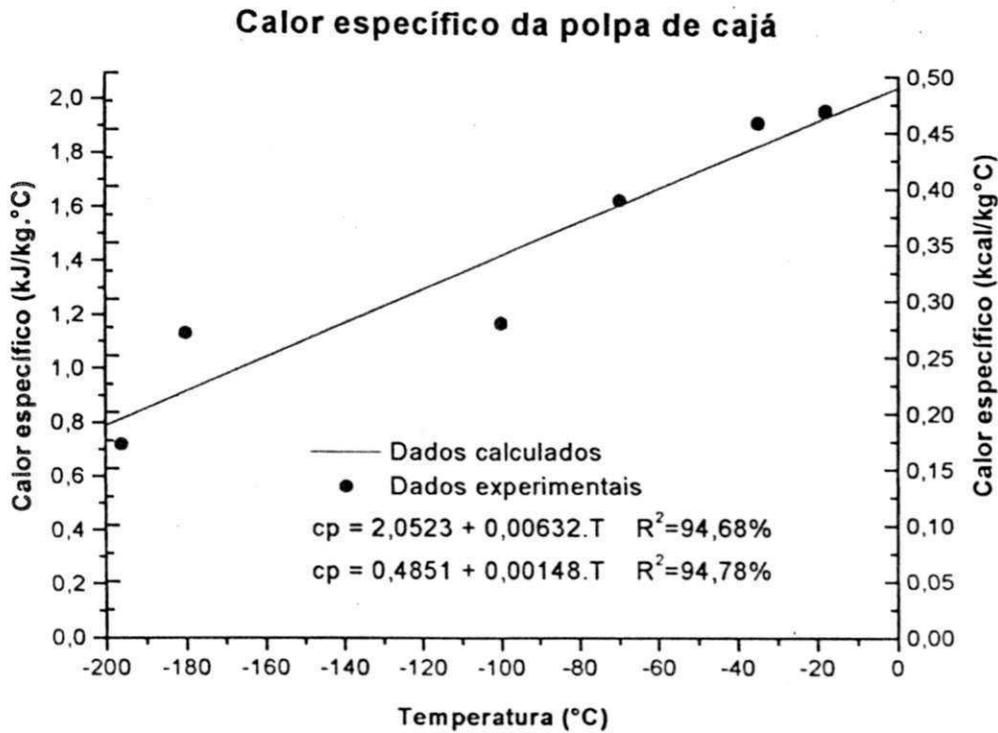
$C_p$  = calor específico, kJ/kg.°C

$C_p$  = calor específico, kcal/kg.°C

$X_w$  = teor de umidade, base úmida

$X_w$  = teor de umidade, %base úmida

Na Tabela 4.8 observa-se que o valor calculado pela equação de SIEBEL (1982), para polpas de frutas com 90% de umidade (1,967 kJ/kg°C) é praticamente igual ao valor encontrado neste trabalho para a polpa de cajá à temperatura de -18°C. No entanto, o valor calculado pelo modelo proposto, por estar baseado apenas no teor de umidade, não expressa a variação que ocorre no calor específico da polpa de cajá quando esta é congelada à temperaturas abaixo de -35°C. Na Figura 4.8 encontra-se a equação que expressa essa variação do calor específico da polpa de cajá, para o intervalo de temperatura de -18 a -196°C.



**Figura 4.8** - Valores de calor específico da polpa de cajá determinados experimentalmente pelo método das misturas.

#### 4.2.3. Difusividade térmica

Nas Figuras de 4.9 a 4.12 e no Anexo 3, encontram-se os dados experimentais obtidos para a determinação da difusividade térmica e as expressões para cada curva obtidas por meio de regressão linear para polpa de cajá de acordo com a metodologia proposta por DICKERSON (1965) às temperaturas de 0, -18, -70 e -100°C. Por meio das equações obtidas nas Figuras 4.9 a 4.12, determinou-se os valores de difusividade térmica para as respectivas temperaturas. Esses valores estão na Tabela 4.9.

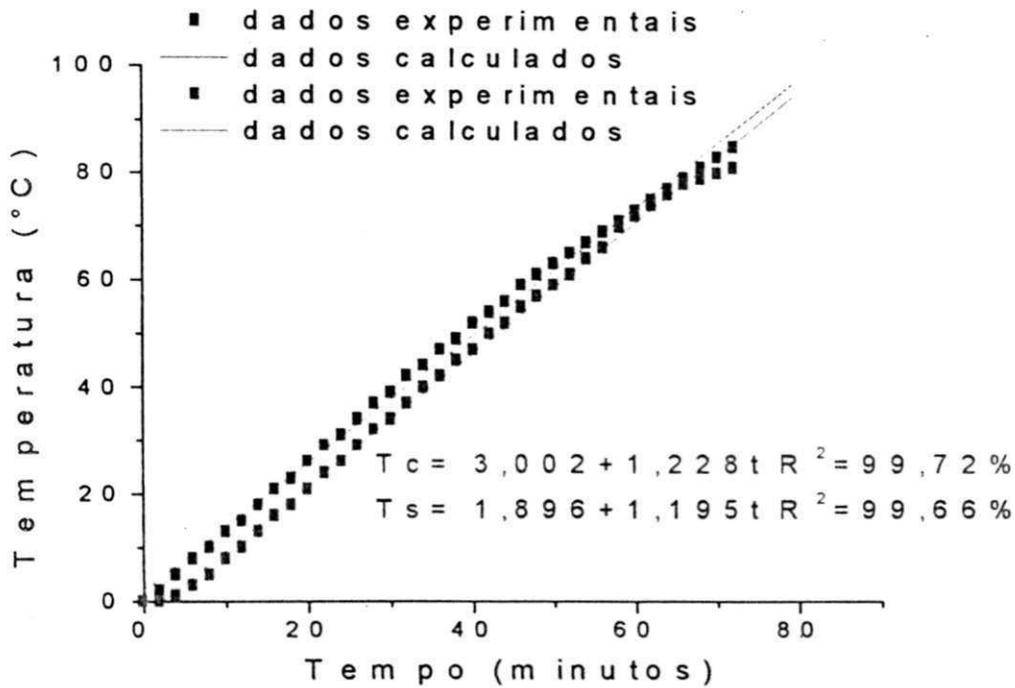


Figura 4.9 - Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de 0°C

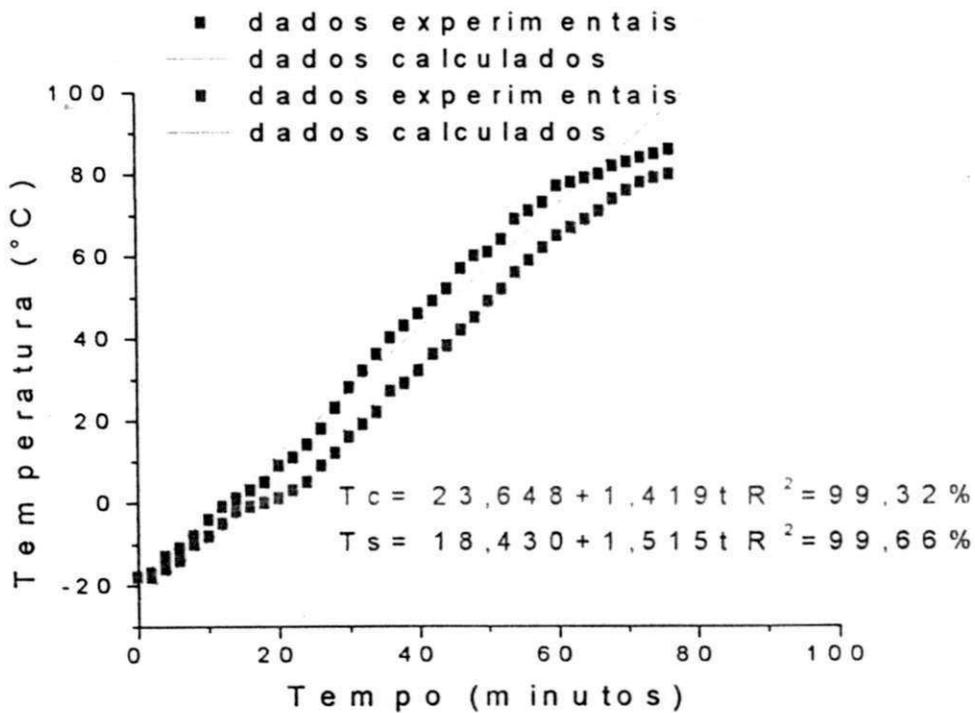


Figura 4.10 - Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de -18°C.

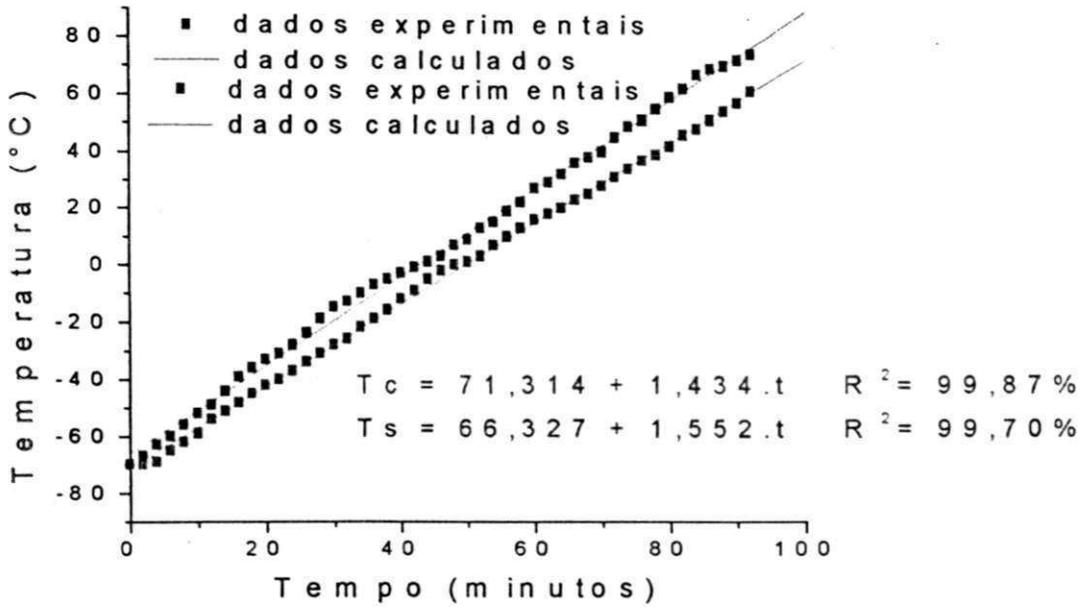


Figura 4.11 - Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$ .

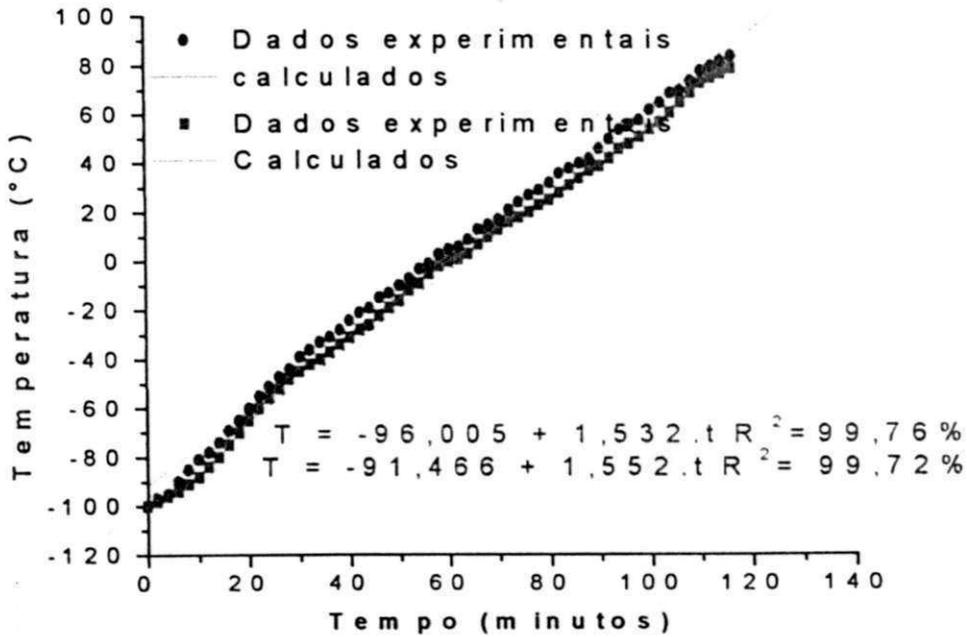


Figura 4.12 - Difusividade térmica em polpa de cajá à temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$ .

**Tabela 4.9** - Difusividade térmica da polpa de cajá

Amostra de polpa de cajá	Difusividade Térmica (cm <sup>2</sup> /min.)	Difusividade Térmica (m <sup>2</sup> /s)
-100°C	0,530	$8,83 \times 10^{-7}$
-70°C	0,508	$8,46 \times 10^{-7}$
-35°C*	0,468	$7,80 \times 10^{-7}$
-18°C	0,439	$7,31 \times 10^{-7}$
0°C	0,385	$6,41 \times 10^{-7}$

\*valor estimado

Na Tabela 4.9 pode-se observar que os valores de difusividade térmica são influenciados pela temperatura, aumentando de acordo com a diminuição da temperatura. Esse fato também foi observado por outros autores, para diversos alimentos. Na Figura 4.13 encontra-se a equação que descreve a variação da difusividade térmica em função das temperaturas negativas.

Na literatura também existem poucos trabalhos para determinação da difusividade térmica em polpas de frutas. Entre esses autores podemos citar SIMÕES (1997) que trabalhou com polpa de manga, SILVA (1997) com polpa de abacaxi, RIEDEL (1969), com polpa de morango e banana e KASAHARA *et al* (1986) com polpa de mamão e chirimóia. Estes autores encontraram valores de difusividade térmica, variando entre  $1$  e  $2,5 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

RAMASWAMY & TUNG (1981), analisaram a difusividade térmica em duas variedades de maçãs, para temperaturas abaixo do ponto de congelamento (-18°C). Para isso utilizaram a equação proposta por Dickerson, tendo antes determinado a condutividade térmica para a variedade Golden Delicious e encontraram um valor de  $9,43 \cdot 10^{-7}$  (m<sup>2</sup>/s), e para a variedade Granny Smith,  $9,26 \cdot 10^{-7}$  (m<sup>2</sup>/s).

Mudanças significativas nos valores de difusividade térmica, durante o congelamento, vem sendo observada em diversos produtos alimentícios. Por exemplo, PARRA (1984), determinou que a difusividade térmica da polpa de merluza, para

temperaturas acima do ponto de congelamento era de  $1,25 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), enquanto que para a temperatura abaixo do ponto de congelamento esta propriedade cresce para  $3,712 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

KASAHARA *et al.* (1986) afirma que a difusividade térmica da polpa de chirimoia apresenta valores de  $1,263 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) para a polpa descongelada e  $2,09 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) para polpa congelada.

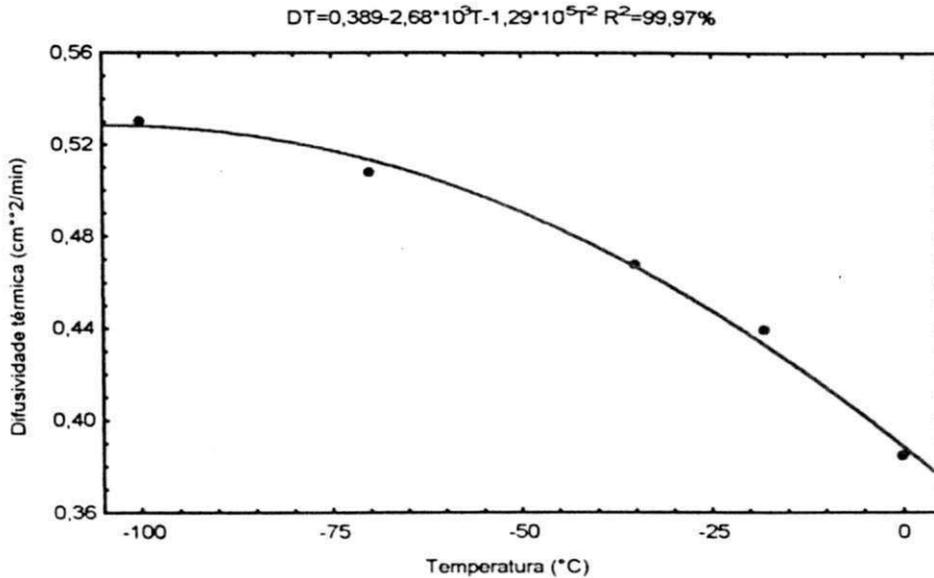


Figura 4.13 - Difusividade térmica da polpa de cajá em função de temperaturas negativas.

#### 4.2.4. Condutividade térmica

A condutividade térmica da polpa de cajá foi calculada pela Equação 2.45. Utilizando a massa específica e a difusividade térmica determinadas experimentalmente e o calor específico determinado experimentalmente, pelo método das misturas e calculado pelo modelo de SIEBEL (1982).

**Tabela 4.10** - Valores de condutividade térmica da polpa de cajá para temperaturas abaixo do ponto de congelamento.

Temperaturas (°C)	*Condutividade térmica (W/m°C)	**Condutividade térmica (W/m°C)
-100	1,65	1,71
-70	1,54	1,64
-35	1,50	1,53
-18	1,43	1,43

\*(K calculado com calor específico determinado pelo método das misturas)

\*\* (K calculado com a equação de Siebel (1982) abaixo do ponto de congelamento)

Na Tabela 4.10 observa-se que os valores de condutividade térmica para polpa de cajá determinados em função do calor específico, determinados pelo método das misturas e pela equação proposta por SIEBEL (1982), para temperaturas abaixo do ponto de congelamento encontra-se entre 1,43 e 1,71 W/m°C.

Nota-se que a condutividade térmica da polpa de cajá aumenta com a diminuição da temperatura, sendo expressa por uma equação linear conforme pode ser observada na Figura 4.14. Os valores de condutividade térmica estão coerentes com os obtidos por RAMASWAMY & TUNG, (1981) que ao estudarem essa propriedade física, para duas variedades de maçã e obtiveram valores de 0,427 e 1,45 W/m°C para o produto descongelado e congelado a -25°C, respectivamente para a variedade Golden Delicious, e 0,398 e 1,22 W/m°C para a variedade Granny Smith.

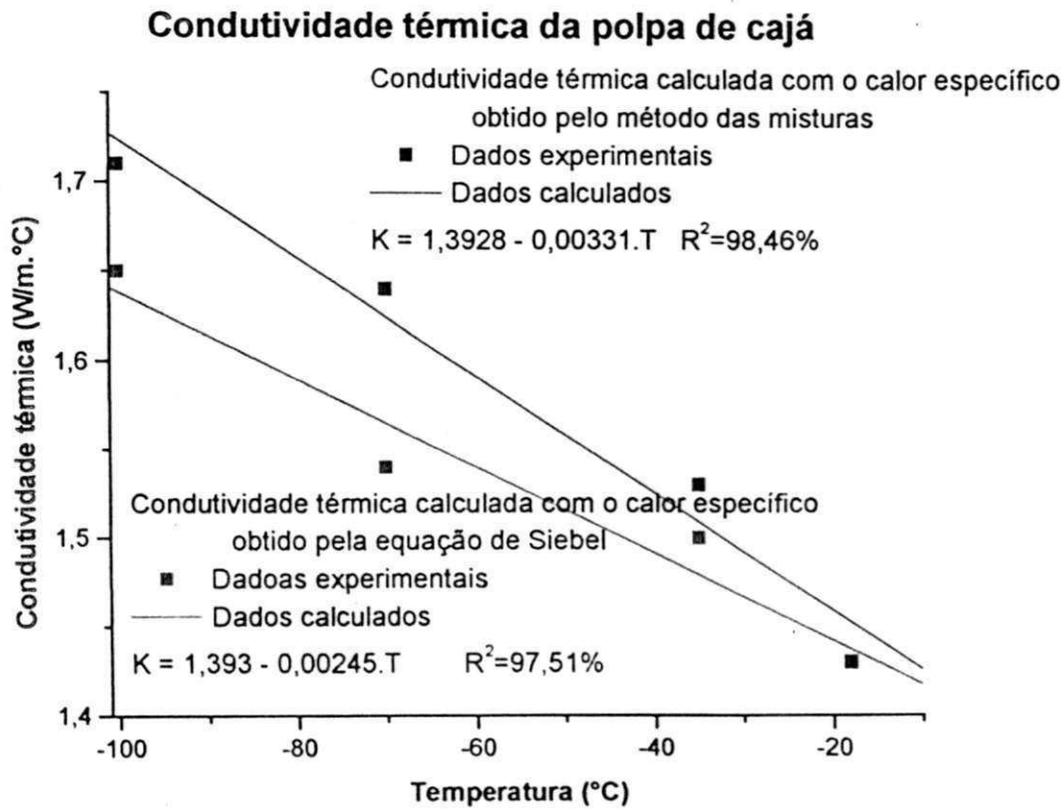


Figura 4.14 - Valores de condutividade térmica para polpa de cajá.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos para polpa de cajá conclui-se que:

- a) Os valores médios de pH, sólidos solúveis totais acidez titulável e umidade foram em média de 4,16 pH, 8,10 °Brix, 1,23% e 90,06% (base úmida) respectivamente;
- b) A massa específica diminui de 1025 a 986 kg/m<sup>3</sup> com a diminuição da temperatura de 0 a -180°C, descrevendo uma curva exponencial;
- c) O calor específico médio obtido usando-se a metodologia proposta por MOLINE *et al.* (1961) varia de 2,79 kJ/kg°C a 3,81 kJ/kg°C, para uma variação de temperatura inicial de -35 a -180 °C, estando esses valores acima dos reportados na literatura e dos obtidos pelo método das misturas;
- d) O calor específico da polpa de cajá obtido pelo método das misturas variou de 1,96 kJ/kg°C a 0,72 kJ/kg°C para uma variação de temperatura de -18 a -196°C respectivamente, descrevendo uma equação linear.
- e) A difusividade térmica e a condutividade térmica aumentam com a diminuição da temperatura, onde se encontrou valores de difusividade térmica de  $6,41 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s a  $8,83 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, para uma variação de temperatura de 0 a -100°C e para condutividade térmica valores de 1,43 W/m°C a 1,71 W/m°C para temperaturas de -18 a -100°C.

**6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists). Official methods of **analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 14. ed. Washington: edited by Williams Horwitz. 1984. 1141p.
- ALVARADO, J.D. Propriedades físicas de frutas. IV- Difusividade y conductividad térmica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**. v. 24, p. 41-47, 1994.
- ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H.; Physical properties of fruits – I – II. Density and viscosity of juices as functions of soluble solids and content and temperature. **Latin American Applied Research**. v.24, p. 41-47, 1989.
- BHOWMIK, S. R.; HAYAKAWA, K. I. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. **Journal of Food Science**. v. 44, n. 2, 1979.
- BLEIROTH, E. W., Condições de armazenamento e sua operação. Tecnologia de Pós-colheita de Frutas Tropicais. Instituto de tecnologia de alimentos. Campinas: GESP/CPA, 1988. cap. XIV , p.155-166.
- CALVACANTE, Q. T. Composição mineral de algumas Spondias In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA 7, Florianópolis, 1983 **Anais Florianópolis, SBF/EMPASC**, v.1, p. 276-283 1983.
- CALVELO, A. F. **Modelo Matemático de la Refrigeracion de Alimentos**. Refrigeración y Congelación de Alimentos. Chile: Editora e Imprenta Maval. 1986. p 111 -132.
- CARDENAS C. & GONZALEZ E. Características físico-químicas de las principales especies marinas para consumo humano. Instituto del Mar, **informe n<sup>o</sup> 2**, 9p. 1979
- CARVALHO, C. R. L.; MANTOVAN, D. M. B.; CARVALHO, P. R. N.; MORAES, R.M. de. **Análise química de alimentos**. Instituto de tecnologia de alimentos, Campinas, 1990, 121p.

CHARM, S. E. **The fundamentals of food engineering**. AVI Publishing Company Inc., Westport, 1971.

CHITARRA, M. I. F. & CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de Frutas e Hortaliças**. Fisiologia e Manuseio. Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE), ESAL 1990. Np.

CHITARRA, M. I. F. Colheita e Qualidade Pós-colheita de frutas: **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte. v 17, n 179, p. 8-18, 1994.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: Lemauguer, M.; Jelen, M. **Food Engineering and Process Applications**. Elsevier Applied Science Publishers, p. 93-101, 1986.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. The thermal properties of tomato juice concentrates. **Transactions of the ASAE**. v. 26, p. 305-311, 1983.

DICHERSON, R. W. **Thermal Properties of Foods: The Freezing Preservation of Foods**. 4. ed. The AVI Publishing Company, v. 2, 1968.

DICKERSON, R. W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**. v. 52, p. 880-886, 1965.

FAPEP/SINE – PB (FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DA PARAIBA – SISTEMA NACIONAL DE EMPREGO). **Curso de tecnologia de industrialização de frutas**. João Pessoa, nov. 1997. 24p.

FENNEMA, O. and W. POWRIE. Fundamentals of low-temperature food preservation. In *Advances in Food Research* n<sup>o</sup> 13 p. 219-330. **Academic Press, N. Y.** 1964.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DA PARAÍBA **Curso de tecnologia de industrialização de frutas**. Profrutas, 24p, 1997.

GAVA, A. J. **Princípios de Tecnologia de Alimentos**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Nobel, 1979. 284p.

GOMES, R. P. **Fruticultura Brasileira**. São Paulo. Nobel, 1989. 448p.



- HELDMAN, D. R. Food properties drying freezing. **Food Technology**. v. 36, n. 2, p. 92-96, 1982.
- HELDMAN, D. y R. P. SINGH. Food process Engineering. Ind AVI Publishing Co. Westport, Connecticut, 1981.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3ª ed. São Paulo, 1985. v.1, 533p.
- KASAHARA, G. I. **Transferencia de Calor y Propiedades Termicas Aplicadas a la Congelación de Productos Vegetales Refrigeracion y Congelacion de Alimentos**. Chile: Editora e Imprenta Maval, 1986.p 61-79.
- KASAHARA, G. I; GARRIDO, B. F.; SIMPSON, R. R.; ALDUNATE, M. I. M.; CORNEJO, F. F. **Cinética de Congelación y Propiedades Termofisicas en dos especies de Frutales Menores Refrigeracion y Congelacion de Alimentos**. Chile: Editora e Imprenta Maval, 1986.p 81-109.
- KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. Thermal properties of grain. **Transactions of the ASAE**, v. 8, n. 1, 1965.
- LEITÃO, M. F. de F. **Microbiologia de frutas tropicais e seus produtos** In: Instituto de tecnologia de alimentos. Alguns aspectos tecnológicos das frutas tropicais e seus produtos. São Paulo: ITAL, 1980, p. 83-126 (Série frutos tropicais).
- LEWIS, M. J. **Propriedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993. 494p.
- MOLINE, S. A.; SAWDYE, A.; SHORT. A. Thermal properties of foods at low temperature: I. Specific heat. **Food Tecchnology**. 228-240, 1961.
- MOHNSENIN, N. N. **Thermal Properties of Foods and Agricultural Materials**. New York, Science Publishers, 1980.
- MORORO, R. C. **Como montar uma pequena fábrica de polpas de frutas**. Viçosa, CPT, 1998, 68p.

- MURAKAMI, E. G.; SWEAT, V. E.; SASTRY, S. K.; KOLBE, E.; HAYAKAWA, K.; DATA, A. Recommended design parameters for thermal conductivity probes for nonfrozen food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 27, p. 109-123, 1996.
- NEVES F. L. C. Armazenamento de gêneros alimentícios, 402p. **Governo do Estado de São Paulo**. SP, 1983.
- NEVES FILHO, L. de C. **Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos**. São Paulo: IBF/ ABRAVA/ SINDRATAR, 1991. 176p.
- NIX, G. H.; LOWERY, G. W.; VACHON, R. I.; TANGER, G. E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. In: Heller, G. G. (Ed), **Progress in Astronautics and Aeronautics**. New York: Academic Press, p. 865-877, 1967.
- O'NEILL, M. J. Measurement of Specific Heat Functions by Differential Scanning Calorimetry. **Analytical Chemistry**, v. 38, n. 10, 1966.
- PARRA, M. **Propiedades térmicas en pulpa de merluza**. UCV 1984 (trabalho de graduação).
- PASQUALONE, S.; MASTANDREA, N. Le proprietà termiche degli alimenti congelati. **Industrie Alimentari**, v. 34, n. 3, p. 261-267, 1995.
- PROGRAMA DE APOIO À PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE FRUTAS. HORTALIÇAS, FLORES E PLANTAS ORNAMENTAIS – FRUPEX. **Manual de exportação de frutas**. MAARA/IICA, 146p, 1995.
- RAMASWAMY, H. S.; TUNG, M. A. Thermophysical properties of apples in relation to freezing. **Journal of Food Science**. v. 46 p.724-728, 1981.
- REIDEL, L. The refrigeration effect required to freeze fruits and vegetables. **Refrig. Engr.** p.59-670, 1951.
- REIDY, G. A.; RIPPEN, A. L. Methods of determining thermal conductivity in foods. **Transaction of the ASAE**, v. 14, n. 2, p. 248-254, 1971.

- SANTOS, A. F. **A cajazeira**. Petrolina, PE: EMBRABA – CPATS, 1978, P. 1-3.(Circula técnico)
- SERENO, A. M.; SÁ, M. M.; FIGUEIREDO, A. M.; CORREA, A. Apparent Heat Capacities, Initial Melting Points and Heats of Melting Frozen Fruits Measurement by Differential Scanning Calorimetry. **Revista Espanõla de Ciencia e Tecnologia de Alimentos**. v. 34, n. 2, p.202-209, 1994.
- SIEBEL, J. E.; Specific heat of various products. **Ice Refrigeration**, v. 2, p. 256-257, 1982.
- SIGRIST, J. M. M. Distúrbios Fisiológicos e pelo Frio. Tecnologia de Pós-colheita de Frutas Tropicais. **Instituto de tecnologia de alimentos**. Campinas: GESP/CPA, 1988. cap. V, p.42-50.
- SILVA, S. B. **Propriedades termofísicas da polpa de abacaxi**. UNICAMP. 1997.134p (Tese Mestrado).
- SIMÕES, M. R.; **Propriedades Termofísicas de Polpa de Manga**: UNICAMP, 1997. 84p. (Tese Mestrado).
- SINGH, R. P. Heating and Cooling Processes for Foods. **Handbook of Food Engineering**. New York edited by HELDMAN, D. R. and LUND, D. B. p. 247-276. 1992.
- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**. v.36, p. 87-91, 1982.
- SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introducción a la Ingennieria de los Alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1997. 544p.
- SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. **Journal of Food Science**. v.39, p. 1080-1083, 1974.
- VIEIRA, J.A G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos** UNICAMP, 1996. (Tese Doutorado).

VOUDOURIS, N.; HAYAKAWA, K. Simultaneous determination of thermal and diffusivity of foods using a point heat source probe: A theoretical analysis. **Lebensmittel – Wissenschaft und – Technologie**. v. 27, p. 522-532, 1994.

WANG, Q.; KOLBE, E. Thermal properties of surimi analyzed using DSC. **Journal of Food Science**, v. 56, n. 2, 1991.

## 7. ANEXOS

### 7.1. Anexo 1

A acidez foi calculada com base no principal ácido presente, expressando-se o resultado como percentagem de acidez titulável. Esta acidez foi determinada por titulação com solução de NaOH (hidróxido de sódio).0,1%N. Para calculo da percentagem de acidez usa-se a formula abaixo:

$$\frac{\text{g de ácido}}{100\text{ml ou } 100\text{g}} = \frac{\text{ml de NaOH.N.equivalente grama de ácido}}{100/\text{g ou ml da amostra} \cdot 100}$$

Onde:

N = normalidade da solução de NaOH;

Equivalente grama dos principais ácidos são:

cítrico = 64 (frutas cítricas);

málico = 67 (maçã, pêssego, acerola);

tartárico = 75 (uva).

#### Umidade

Pesou-se 10g da amostra em cápsula de porcelana previamente tarada e, em seguida, levou-se a estufa a 70°C, onde o material foi dessecado até peso constante. Relacionou-se a perda de peso para 100g da amostra

## 7.2. Anexo 2

**Tabela 7.1** - Variação da temperatura do gelo em função do tempo para determinação do calor específico.

Tempo (min)	T(°C) -180	T(°C) -100	T(°C) -70	T(°C) -35
0	-180	-100	-70,1	-35,1
2	-176,9	-96,7	-67,2	-34,3
4	-173,2	-92,9	-64,5	-33,7
6	-169,2	-88,9	-62,1	-33
8	-164,5	-85,6	-60	-32,2
10	-159,9	-82,1	-57,7	-31,5
12	-157,4	-78,8	-55,5	-30,8
14	-146,6	-75,9	-53,3	-30,1
16	-143	-73	-51,3	-29,3
18	-138,8	-70,1	-49,3	-28,7
20	-135,4	-67,2	-47,5	-28,1
22	-131,8	-64,5	-45,7	-27,3
24	-128,4	-62,1	-43,8	-26,6
26	-125,1	-60	-41,9	-26
28	-121,7	-57,7	-40,4	-25,3
30	-118,7	-55,5	-38,7	-24,4
32	-116,2	-53,3	-37,1	-24
34	-113,3	-51,3	-35,6	-23,4
36	-110,8	-49,3	-33,9	-22,7
38	-108,8	-47,5	-32,6	-22,3
40	-106,2	-45,7	-31,2	-21,8
42	-104,2	-43,8	-29,8	-21,2
44	-102,1	-41,9	-28,4	-20,6
46	-99,9	-40,4	-27	-20,1
48	-97,7	-38,7	-25,7	-19,5
50	-95,8	-37,1	-24,2	-18,9
52	-93,7	-35,6	-23,1	-18,4
54	-91,9	-33,9	-22,5	-17,8
56	-90,1	-32,6	-20,9	-17,4
58	-88,2	-31,2	-19,8	-16,9
60	-86,4	-29,8	-18,7	-16,4
62	-84,7	-28,4	-17,7	-15,9
64	-83,1	-27	-16,6	-15,3
66	-81,5	-25,7	-15,6	-14,9
68	-79,7	-24,2	-14,6	-14,3
70	-78,2	-23,1	-13,6	-13,9
72	-76,7	-23	-12,6	-13,4
74	-75,2	-20,9	-11,7	-12,8

76	-73,7	-19,8	-10,8	-12,3
78	-72,1	-18,7	-9,9	-11,8
80	-70,8	-17,7	-9,1	-11,4
82	-69,4	-16,6	-8,2	-11
84	-68	-15,6	-7,4	-10,6
86	-66,7	-14,6	-6,5	-10,2
88	-65,4	-13,6	-5,4	-9,7
90	-64,1	-12,6	-4,7	-9,3
92	-62,9	-11,7	-3,9	-8,9
94	-61,7	-10,8	-3,2	-8,4
96	-60,6	-9,9	-2,5	-8
98	-59,4	-9,1	-2,1	-7,6
100	-58,2	-8,2	-1,6	-7,2
102	-57,1	-7,4	-1,2	-6,7
104	-56	-6,5	-0,8	-6,4
106	-55	-5,4	-0,5	-6
108	-53,9	-4,7	-0,2	-5,6
110	-52,9	-3,9	-0,1	-5,3
112	-51,9	-3,2	0	-4,8
114	-50,9	-2,5		-4,4
116	-49,9	-2,1		-4,1
118	-48,9	-1,6		-3,7
120	-47,9	-1,2		-3,4
122	-47	-0,8		-3
124	-46,2	-0,5		-2,7
126	-45,2	-0,2		-2,4
128	-44,3	-0,1		-2,2
130	-43,4	0		-2
132	-42,4			-1,7
134	-41,4			-1,5
136	-40,7			-1,3
138	-39,9			-1,1
140	-39,2			-0,8
142	-38,3			-0,7
144	-37,4			-0,6
146	-36,8			-0,5
148	-36			-0,3
150	-35,1			-0,2
152	-34,3			-0,1
154	-33,7			0
156	-33			
158	-32,2			
160	-31,5			
162	-30,8			
164	-29,3			
166	-28,7			
168	-28,1			

170	-27,3			
172	-26,6			
174	-26			
176	-25,3			
178	-24,4			
180	-24			
182	-23,4			
184	-22,7			
186	-22,3			
190	-21,8			
192	-21,2			
194	-20,6			
196	-20,1			
198	-19,5			
200	-18,9			
202	-18,4			
204	-17,8			
206	-17,4			
208	-16,9			
210	-16,4			
212	-15,9			
214	-15,3			
216	-14,9			
218	-14,3			
220	-13,9			
222	-13,4			
224	-12,8			
226	-12,3			
228	-11,8			
230	-11,4			
232	-11			
234	-10,6			
236	-10,2			
238	-9,7			
240	-9,3			
242	-8,9			
244	-8,4			
246	-8			
248	-7,6			
250	-7,2			
252	-6,7			
254	-6,4			
256	-6			
258	-5,6			
260	-5,3			
262	-4,8			
264	-4,4			

266	-4,1			
268	-3,7			
270	-3,4			
272	-3			
274	-2,7			
276	-2,4			
278	-2,2			
280	-2			
282	-1,7			
284	-1,5			
286	-1,3			
288	-1,1			
290	-0,8			
292	-0,7			
294	-0,6			
296	-0,5			
298	-0,3			
300	-0,2			
302	-0,1			
304	0			

**Tabela 7.2** - Variação da temperatura da polpa de cajá em função do tempo para determinação do calor específico.

Tempo (min)	T(°C) -180	T(°C) -100	T(°C) -70	T(°C) -35
0	-180	-100	-70	-35,1
4	-178,9	-99,5	-68,4	-34,4
8	-178,1	-98,3	-67,2	-34,2
12	-176,5	-97,2	-66,1	-33,8
16	-175,3	-96,4	-65,3	-33,3
20	-174,4	-94,5	-63,7	-31,8
24	-172,1	-93	-62,5	-31,5
28	-169,6	-92,4	-60,2	-31,2
32	-167,4	-90,5	-59,3	-31
36	-165,3	-88,4	-57,2	-30
40	-163	-87,5	-56,1	-29,8
42	-162,2	-86,1	-55,1	-28,7
48	-160,7	-84,2	-54,3	-28,1
52	-158,3	-83,7	-53,4	-27,5
56	-156,1	-81,5	-52	-26,5
60	-155	-79,4	-51,7	-25,7
64	-154,6	-77,1	-50,3	-25
68	-153,2	-76,3	-49,1	-24,5
72	-152,1	-75,1	-48,7	-23,8
76	-149,9	-73,1	-46,5	-23,2
80	-148,4	-72,6	-45,1	-22,8
84	-147,5	-70,4	-44,8	-21,4
88	-144,2	-69,5	-43,2	-21
92	-143,5	-68,1	-42,5	-20,6
96	-141,7	-66,7	-41,7	-19,4
100	-138,1	-65	-40,2	-18,8
104	-136	-63,8	-39,2	-18
108	-135,3	-62,1	-38,4	-17,2
112	-133,1	-60,7	-37,5	-16,4
116	-132,5	-58,3	-36,5	-15,7
120	-131,7	-57,1	-35,2	-15,3
124	-130,2	-56,4	-33,4	-14,9
128	-129,6	-55	-32,4	-14,3
132	-127,4	-54,2	-31,8	-13,4
136	-126,8	-53,2	-30	-12,7
140	-124,2	-52,4	-29,5	-12,1
144	-123,3	-50,1	-28,7	-11,3
148	-122,6	-49,2	-27,6	-10,8
152	-121,5	-48,7	-26,4	-10,1
156	-120,5	-46,5	-25,3	-9,8

160	-119,1	-45,3	-24,1	-9,7
164	-118,1	-44,2	-23,5	-9,4
168	-117,5	-43,2	-22,7	-9,1
172	-116,6	-42,1	-21,5	-8,9
176	-115,7	-41	-20,2	-8,6
180	-114,2	-40,2	-19,5	-8
184	-113,5	-39,5	-18,7	-7,8
188	-112,9	-37,4	-18,2	-7,7
192	-110,4	-36,9	-17,7	-7,6
196	-109,3	-36	-16,8	-7,4
200	-108,3	-35,1	-16,3	-7,3
204	-107,4	-34,5	-15,5	-7,2
208	-106,9	-33	-14,6	-7,1
212	-105,3	-32,9	-13,9	-7
216	-103,9	-32,1	-13,1	-6,9
220	-100,9	-31,5	-12,8	-6,8
224	-100	-30,4	-12	-6,4
228	-98,7	-29,7	-11,7	-6,3
232	-97,9	-28,6	-11,2	-6
236	-96,3	-27,4	-10,8	-5,9
240	-95,8	-26,1	-10,5	-5,8
244	-94,3	-25,3	-9,8	-5,7
248	-93	-24	-9,7	-5,6
252	-92,7	-23,4	-9,4	-5,5
256	-91,2	-23	-8,9	-5,5
260	-90,1	-22,2	-8,5	-5,3
264	-89,3	-21,7	-8,1	-5,2
268	-88	-21,3	-7,8	-5,1
272	-86,9	-20,6	-7,5	-5
276	-85,6	-19,7	-7,4	-4,9
280	-84,7	-19	-7,2	-4,8
284	-83,3	-18,5	-7	-4,7
288	-82,4	-17,6	-6,7	-4,7
292	-81,2	-17,3	-6,5	-4,6
296	-80,6	-16,5	-6,3	-4,4
300	-79,2	-15,5	-6,2	-4,2
304	-78,9	-15	-6,1	-4
308	-76,4	-14,3	-5,9	-3,9
312	-75,8	-13,8	-5,8	-3,7
316	-74,4	-13,6	-5,6	-3,6
320	-73,2	-13	-5,4	-3,5
324	-72,9	-12,9	-5,3	-3,4
328	-70,6	-12,3	-5	-3,3
332	-69,3	-11,7	-4,8	-3,2
336	-68,1	-11	-7,6	-3,1
340	-67,8	-10,8	-4,5	-2,9
344	-66,5	-10,4	-4,3	-2,7

348	-65,2	-9,8	-4,2	-2,6
352	-64,9	-9,6	-4,1	-2,5
356	-63,7	-9,1	-4	-2,3
360	-61,4	-8,7	-3,8	-2,3
364	-60,1	-8,5	-3,6	-2,1
368	-59,8	-8,4	-3,5	-2
372	-58,7	-8	-3,4	-1,9
376	-56,4	-7,9	-3,3	-1,8
380	-55	-7,5	-3,1	-1,8
384	-54,2	-7,4	-2,9	-1,7
388	-53,9	-7,3	-2,7	-1,6
392	-52,6	-7,2	-2,6	-1,5
396	-51,4	-7,2	-2,5	-1,4
400	-50,9	-6,9	-2,3	-1,3
404	-49,6	-6,8	-2,3	-1,2
408	-48,4	-6,6	-2,1	-1,2
412	-47,1	-6,4	-2	-1,1
416	-45,9	-6,1	-1,9	-0,8
420	-45,5	-5,7	-1,8	-0,6
424	-44,3	-5,6	-1,8	-0,5
428	-44	-5,4	-1,7	-0,4
432	-43,6	-5,3	-1,6	0,3
436	-42,9	-5,2	-1,5	-0,3
440	-41,2	-5,1	-1,4	-0,2
444	-40,7	-5	-1,3	-0,2
448	-39,9	-4,8	-1,2	-0,1
452	-38,7	-4,7	-1,2	0
456	-37,2	-4,4	-1,1	
460	-36,5	-4,3	-0,8	
464	-35,2	-4,2	-0,6	
468	-34,9	-4,2	-0,5	
472	-33,4	-4,2	-0,4	
476	-32,5	-4	0,3	
480	-31,6	-3,9	-0,2	
484	-30,4	-3,7	-0,1	
488	-29,2	-3,6	0	
492	-28,1	-3,5		
496	-27,9	-3,4		
500	-27	-3,4		
504	-26,7	-3,3		
508	-25,7	-3,2		
512	-25	-3,1		
516	-24,5	-2,9		
520	-23,8	-2,7		
524	-23,2	-2,6		
528	-22,8	-2,5		
532	-21,4	-2,4		

536	-21	-2,3		
540	-20,6	-2,2		
544	-19,4	-2,1		
548	-18,8	-2		
552	-18	-1,9		
556	-17,2	-1,8		
560	-16,4	-1,7		
564	-15,7	-1,7		
568	-15,3	-1,6		
572	-14,9	-1,5		
576	-14,3	-1,5		
580	-13,4	-1,4		
584	-12,7	-1,2		
588	-12,1	-1,2		
592	-11,3	-1,1		
596	-10,8	-1,1		
600	-10,1	-1		
604	-9,8	-0,8		
608	-9,7	-0,7		
612	-9,4	-0,6		
616	-9,1	-0,6		
620	-8,9	-0,5		
624	-8	-0,4		
628	-7,8	-0,4		
632	-7,6	-0,3		
336	-7,4	-0,4		
640	-7,3	-0,4		
644	-7,1	-0,3		
648	-6,9			
652	-6,8			
656	-6,4			
660	-6			
664	-5,8			
668	-5,5			
672	-5,1			
676	-4,9			
682	-4,8			
672	-4,7			
676	-4,7			
680	-4,6			
684	-4,4			
688	-4,2			
690	-4			
694	-3,9			
698	-3,7			
702	-3,6			
706	-3,5			

710	-3,4			
714	-3,3			
718	-3,2			
722	-3,1			
726	-2,9			
730	-2,7			
734	-2,6			
738	-2,5			
742	-2,3			
748	-2,3			
752	-2,1			
756	-2			
760	-1,9			
764	-1,8			
768	-1,8			
772	-1,7			
776	-1,6			
780	-1,5			
784	-1,4			
788	-1,3			
792	-1,2			
796	-1,2			
800	-1,1			
804	-0,8			
806	-0,6			
810	-0,4			
814	-0,3			
816	-0,1			
820	0			

## 7.3. Anexo 3

Tabela 7.3 – Variação da temperatura com o tempo para determinação da difusividade térmica da polpa de cajá.

Tempo (min)	Ts(°C)	Tc(°C)	Ts(°C)	Tc(°C)	Ts(°C)	Tc(°C)	Ts(°C)	Tc(°C)
	-100	-100	-70	-70	-18	-18	0	0
0	-100	-100	-70	-70	-18	-18	0	0
2	-97	-99	-67	-70	-17	-18	2	0
4	-93	-97	-63	-69	-13	-16	5	1
6	-88	-94	-60	-65	-11	-14	8	3
8	-83	-91	-56	-62	-8	-10	10	5
10	-77	-88	-52	-59	-4	-8	13	8
12	-72	-84	-49	-54	-1	-5	15	10
14	-67	-70	-44	-51	0	-2	18	13
16	-63	-65	-39	-48	1	-1	21	16
18	-60	-62	-36	-45	3	0	23	18
20	-56	-59	-33	-42	5	1	26	21
22	-52	-54	-31	-40	9	3	29	24
24	-49	-51	-28	-37	11	5	31	26
26	-44	-48	-24	-34	14	9	34	29
28	-39	-45	-19	-31	18	12	37	32
30	-36	-42	-15	-28	23	16	39	34
32	-33	-40	-13	-26	28	19	42	37
34	-31	-37	-10	-22	32	22	44	40
36	-28	-34	-7	-19	36	27	47	42
38	-24	-31	-5	-16	40	29	49	45
40	-19	-28	-3	-12	43	32	52	47
42	-15	-26	-1	-9	46	36	54	50
44	-13	-22	1	-5	49	38	56	52
46	-10	-19	3	-2	52	42	59	55
48	-7	-16	7	0	57	45	61	57
50	-5	-12	9	1	60	49	63	59
52	-3	-9	13	3	61	52	65	61
54	-1	-5	15	7	64	56	67	64
56	0	-2	19	10	69	59	69	66
58	1	0	22	13	71	62	71	70
60	3	1	27	16	73	65	73	72
62	7	3	29	18	77	67	75	74
64	9	7	32	20	78	69	77	76
66	13	10	36	23	79	71	79	78
68	15	13	38	25	80	74	81	79
70	19	16	40	28	82	76	83	80
72	22	18	45	31	84	78	85	81

74	27	20	49	34	85	79		
76	29	23	51	37	85	80		
78	32	25	55	39				
80	36	28	59	42				
82	38	31	62	46				
84	40	34	67	48				
86	45	37	69	51				
88	49	39	70	54				
90	51	42	72	57				
92	55	46	74	61				
94	59	48						
96	62	51						
98	67	54						
100	69	57						
102	70	61						
104	72	65						
106	74	69						
108	76	73						
110	80	75						
112	82	77						
114	84	79						
116	85	80						