



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA: ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS



ESTÁGIO SUPERVISIONADO

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE FIGO-DA-ÍNDIA

MARIA DA CONCEIÇÃO TRINDADE BEZERRA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

ABRIL - 2008



Biblioteca Setorial do CDSA. Abril de 2021.

Sumé - PB



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DO ESTÁGIO SUPERVISIONADO

MARIA DA CONCEIÇÃO TRINDADE BEZERRA

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE FIGO-DA-ÍNDIA

BANCA EXAMINADORA:

NOTA

Rossana M^a F. de Figueirêdo

9,0

Prof.^ª Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo – Orientadora

Alexandre J M Queiroz

9,0

Prof. Alexandre José de Melo Queiroz – Examinador

Josivanda P. Gomes

9,0

Prof.^ª Josivanda Palmeira Gomes - Examinadora

ABRIL - 2008

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE FIGO-DA-ÍNDIA

MARIA DA CONCEIÇÃO TRINDADE BEZERRA

Estágio Supervisionado apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do diploma de graduação em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

Campina Grande - Paraíba

ABRIL – 2008

DEDICÁTORIA

A meus queridos pais, **Antônio Luiz e Edeleuza**, razões de minha existência, que incansavelmente estiveram ao meu lado, dando-me sempre o apoio necessário para todas as minhas realizações, por tanto amor e carinho que me foram ofertados durante toda minha existência.

A meus irmãos: **Luciano, Lélis, Lesliane e Izabelle**, por estarem sempre ao meu lado, com gestos e palavras de amor e amizade.

Ao meu companheiro de todas as horas, **Jofran Luiz**, pela paciência, amor e dedicação, que quando ausente, esteve sempre comigo, me apoiando e ajudando a enfrentar todas as dificuldades surgidas.

Amo muito todos vocês!

AGRADECIMENTOS

A Deus Todo Poderoso, por ter concedido tantas bênçãos em minha vida, dando-me sempre forças para lutar e seguir em frente em todos os momentos.

A meus pais e irmãos, por terem me dedicado tanto amor, carinho, amizade e compreensão, os quais sempre foram fundamentais para minha formação acadêmica e pessoal.

A todos os meus familiares, tios, primos e avôs, por serem muito especiais em minha vida.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, UFCG, por terem sido imprescindíveis para minha formação acadêmica.

Aos Professores Rossana e Alexandre pelas orientações e por serem exemplos de determinação.

Aos meus amigos Abel, Alberto, Aline, Amilton, Cibelle, Cláudio, Débora, Edvaldo, Heber, Jean, Joelma, Joelma Sales, Kaline, Lidianne, Marcelo, Niédja, Patrícia, Rafael, Riuzuanni, Sebastião, Sileno, Silvana, Silvanira, Simone e Valneide por terem me proporcionados inúmeros momentos de alegria e principalmente de companheirismo.

E em especial aos amigos que se tornaram irmãos: Clarice, Denise, Janildo, Karla, Luciano, Pollyana e Tâmila Kassimura.

E para finalizar um amigo mais que especial, Jofran Luiz, por ter significado muito durante todos estes anos.

Muito Obrigado!!!

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – Figo-da-índia	3
2.2 - Sólidos solúveis totais	5
2.3 – Umidade	6
2.4 - Propriedades termofísicas	7
2.4.1 - Massa específica	8
2.4.2 - Calor específico	11
2.4.3 - Difusividade térmica	15
2.4.4 - Condutividade térmica	19
3 - MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 - Localização do experimento	23
3.2 - Matéria-prima	23
3.2.1 - Processamento do figo-da-índia	23
3.3 - Sólidos solúveis totais (°Brix)	24
3.4 - Umidade e sólidos totais	24
3.5 - Propriedades termofísicas	24
3.5.1 - Massa específica	24
3.5.2 - Calor específico	26
3.5.3 - Difusividade térmica	28
3.5.4 - Condutividade térmica	30
3.6 - Análise estatística	31
3.7 - Erro percentual	31
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 – Sólidos solúveis totais (°Brix)	33
4.2 – Umidade e sólidos totais	33
4.3 - Propriedades termofísicas	34
4.3.1 - Massa específica	34

4.3.2 - Calor específico	39
4.3.3 - Difusividade térmica	41
4.3.4 - Condutividade térmica	43
5 - CONCLUSÕES	44
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Opuntia ficus indica</i>	4
Figura 2 - Frutos da palma descascados	5
Figura 3 - Fluxograma do processamento do figo-da-índia	23
Figura 4 - Picnômetro	25
Figura 5 - Esquema do calorímetro de mistura	26
Figura 6 - Esquema utilizado para a determinação da difusividade térmica	29
Figura 7 - Valores experimentais e teóricos da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura	37
Figura 8 - Valores teóricos da massa específica em função da temperatura preditos por equações da literatura, para polpa de figo-da-índia	39
Figura 9 - Diagrama temperatura versus tempo dos três experimentos para a determinação da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor nutricional da palma em comparação com outras verduras (por 100 gramas do produto)	4
Tabela 2 - Equações para cálculo da massa específica em produtos alimentícios	25
Tabela 3 - Equações para o cálculo do calor específico de alimentos	28
Tabela 4 - Equações utilizadas no cálculo da difusividade térmica de produtos alimentícios	30
Tabela 5 - Equações para cálculo da condutividade térmica em alimentos	31
Tabela 6 - Sólidos solúveis totais (°Brix) da polpa de figo-da-índia	33
Tabela 7 - Valores dos sólidos totais e da umidade da polpa de figo-da-índia	34
Tabela 8 - Massa específica (kg/m^3) da polpa de figo-da-índia integral em diferentes temperaturas	34
Tabela 9 - Análise de variância dos valores da massa específica da polpa de figo-da-índia	35
Tabela 10 - Valores médios da massa específica da polpa de figo-da-índia em diferentes temperaturas	35
Tabela 11 - Análise de variância das regressões polinomiais da massa específica da polpa de figo-da-índia integral em função da temperatura	36
Tabela 12 - Equações propostas para o cálculo da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura	36
Tabela 13 - Valores teóricos da massa específica (kg/m^3) para a polpa de figo-da-índia integral, calculados a partir de equações propostas em literatura e erro percentual	38
Tabela 14 - Valores experimentais do calor específico da polpa de figo-da-índia	40
Tabela 15 - Valores teóricos do calor específico para a polpa de figo-da-índia e os erros percentuais	40
Tabela 16 - Valores experimentais da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia	42
Tabela 17 - Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa de figo-da-índia e os erros percentuais	42
Tabela 18 - Valores experimentais da condutividade térmica da polpa de figo-da-índia	43

Tabela 19 - Valores teóricos da condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$) da polpa de figo-da-índia e os respectivos erros percentuais

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil produz é um dos maiores produtores de frutas do mundo, produzindo cerca de 43 milhões de toneladas de frutas por ano, com uma área plantada de 2,2 milhões de hectares, correspondendo ao terceiro maior produtor de frutas frescas do mundo, superado apenas pela China e Índia. (NAKA, 2002).

O Nordeste brasileiro é caracterizado por ser uma região de clima semi-árido, com baixos índices pluviométricos, solos rasos e pedregosos, que impõem condições limitantes à exploração de atividades agrícolas de ciclo anual. Em algumas microrregiões a escassez de água restringe, até mesmo, o uso da irrigação, onde a dificuldade para o uso dessa prática se dá inclusive pela ocorrência de águas com índice de salinidade impróprio para uso em cultivos. A exploração agrícola nessas condições deve se deter no estudo de culturas adaptadas a essas limitações, destacando-se a produção de frutas tropicais, atividade que se beneficia do clima quente e da pequena amplitude térmica ao longo do ano, respondendo com qualidade e produtividade (GRANGEIRO et al., 2007).

O figo-da-índia ou fruto da palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill.) é uma das espécies frutíferas que se constitui em alternativa econômica para o semi-árido brasileiro. Pertence à família das cactáceas, as quais são excepcionalmente adaptadas às condições edafo-climáticas locais, podendo contribuir para o desenvolvimento da região. Essa cultura é produzida no Nordeste para exploração dos cladódios ou “raquetes”, no uso de ração animal. A palma, como é mais conhecida, vegeta perfeitamente no clima semi-árido brasileiro, produzindo forragem e frutos, mesmo em anos com baixos índices pluviométricos. De acordo com BARBERA (2001) os maiores produtores do Nordeste são os estados da Paraíba, Pernambuco e Alagoas.

É importante destacar o aumento da demanda dos produtos alimentícios no país, trazendo como consequência a exigência de modernização, adequação tecnológica e maior qualidade para as indústrias. O cumprimento dessas exigências só acontecerá com maiores informações científicas sobre o processamento de alimentos, exigindo conhecimento das propriedades físicas para os cálculos dos processos (MOURA et al., 2003).

De acordo com MOURA et al. (2003) o dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos, principalmente os pasteurizadores e outros que requerem bombeamento do produto, exigem dados precisos das propriedades térmicas dos produtos, tais como condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, e de como essas propriedades se comportam durante o processo, em função da temperatura.

1.1 - Objetivo

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de determinar as propriedades termofísicas calor específico, massa específica, difusividade térmica e condutividade térmica da polpa de figo-da-índia (*Opuntia ficus indica* Mill.).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Figo-da-índia

Segundo ALBUQUERQUE et al.(2005) as cactáceas são endêmicas das Américas, havendo no gênero *Opuntia* em torno de 300 espécies distribuídas desde o Canadá até a Patagônia, e sendo *Nopalea* considerada uma subespécie desse gênero. No México, existem 104 espécies de *Opuntia* e 10 de *Nopalea*, sendo que 24 espécies têm diversas utilizações: 15 são consumidas como ração, 6 como frutos e 3 como legume.

As cactáceas são plantas suculentas originalmente existentes apenas no continente americano e distribuídas primeiramente nos Trópicos (HOFFMANN, 2001).

A palma é uma planta de múltiplas utilidades, dela tudo se aproveita nas áreas secas do México, de onde é originada (SIMÕES et al., 2005). Essa cactácea foi introduzida no Brasil, provavelmente, no século XVIII, procedente das Ilhas Canárias, destinada à criação da cochonilha (*Dactilopius cacti* L.) para produção de corantes. Com o abandono dessa atividade, as duas espécies introduzidas de palma (*Opuntia ficus indica* L.) Mill., e (*Nopalea cochenillifera* Salm.-Dyck,) passaram a ser vistas apenas como plantas ornamentais (ALBUQUERQUE et al., 2005). No Brasil, a expressão palma forrageira é usada para designar tanto variedades da espécie *Opuntia ficus indica* como de *Nopalea cochenillifera* (SIMÕES et al., 2005). Somente a partir do início do século passado é que a palma passou a ser usada como forragem no semi-árido do Nordeste (ALBUQUERQUE et al., 2005).

No Brasil, a palma produz praticamente durante o ano todo, mas o seu período de safra ocorre entre os meses de dezembro e março. O cultivo para a produção de frutas, se concentra mais no estado de São Paulo. O cultivo de cactáceas no Nordeste do Brasil, abrange extensões de mais de 400.000 ha e as espécies mais cultivadas são *O. ficus indica* e *N. cochenillifera* (SANTOS & ALBUQUERQUE, 2002).

A *O. ficus indica* (Figura 1) é uma planta arborescente, que pode atingir de 3 a 5 m de altura, apresentando uma copa larga, em torno de 1,5 m de diâmetro. É formada por artigos suculentos ou raquetes, chamadas botanicamente de “cladódios”. Apresentam córtex verde que, na ausência de folhas, exercem a função de órgão de fotossíntese. Suas dimensões são de 30 a 40 cm de comprimento por 18 a 25 cm de largura e 19 a 28 mm de espessura (ALBUQUERQUE et al., 2005).



Figura 1 - *Opuntia ficus indica* (Fonte: UNIVERSITY, 2007)

Na Tabela 1 tem-se o valor nutricional dos brotos da palma, em comparação com o chuchu, o tomate, o pimentão, a couve, o quiabo e a alface, evidenciando as vantagens como fonte de vitamina A e de ferro.

Tabela 1 - Valor nutricional da palma em comparação com outras verduras (por 100 gramas do produto)

Alimento	Vitamina A (mcg)	Ferro (mg)	Cálcio (mg)
Palma (broto)	220	2,8	200
Tomate	180	0,8	10
Pimentão	150	0,6	7
Vagem	120	1,3	55
Quiabo	90	0,6	60
Chuchu	20	0,5	7
Couve-flor	5	0,7	120

Fonte: DEIRÓ et al. (2003)

Existem diversas variedades de fruto da palma (Figura 2), uns apresentam coloração verde-amarela, laranja e até mesmo roxa, e apresentam espinhos no pericarpo. Esses frutos possuem elevado valor nutritivo, apresentando em sua composição fibras, carboidratos solúveis e cálcio, são ricos em 306 vitaminas (principalmente A e C) e magnésio. A polpa, amarelo-ouro tem aparência porosa, com pequenas e numerosas sementes pretas (PIMIENTA-BARRIOS, 1990; SAÉNZ et al., 1998; ASKAR & EL-SAMAHY, 1981).



Figura 2 – Frutos da palma descascados (Fonte: CASTELAZO, 2008)

Esse fruto apresenta um sabor característico doce, com leve acidez e é bastante refrescante (LOPES, 2005). A polpa apresenta-se com pouco valor calórico e sem gorduras, adequada às dietas de emagrecimento. Os frutos com formato oval, amadurecem em cerca de 100 dias após o florescimento.

No Sudeste do país o mercado de figo-da-índia é garantido, sendo consumidos *in natura* e industrializados na forma de doces, geléia, licor e na produção de medicamentos.

A valorização da cultura da palma proporcionará um melhor desenvolvimento sustentável da região Nordeste, principalmente do Cariri Paraibano, com a utilização do figo-da-índia como matéria prima para produzir diversos produtos como vinagre, fermentado desse fruto, e outros produtos de gênero alimentício.

Segundo MOBHAMMER et al. (2005) esta cultura pode ser explorada em diferentes campos farmacológicos como: anti-inflamatórios, analgésicos, anti-virais e anti-oxidante. É usada também para a recuperação de solos e como alimento para a fauna silvestre (SCHEINVAR, 1985).

2.2 - Sólidos solúveis totais

Segundo CHITARRA & CHITARRA (1990), os sólidos solúveis totais indicam a quantidade, em gramas, dos sólidos que se encontram dissolvidos no suco ou polpa. São comumente expressos em °Brix, e tendem a aumentar com o estágio de maturação, variando de acordo com os produtos. Os sólidos solúveis podem ser medidos no campo ou na indústria com o auxílio de refratômetro.

A análise dos sólidos solúveis totais (°Brix), tem grande importância no setor industrial, sendo utilizado para o controle dos ingredientes que serão adicionados ao

produto e em sua qualidade final. A sua determinação é realizada nas indústrias de doces, sucos, néctar, polpas, leite condensado, álcool, açúcar, sorvetes, licores, bebidas em geral, etc. (ARAÚJO et al., 2002).

De acordo com RODRIGUES et al. (1977) o teor de sólidos solúveis (°Brix) é muito importante nos frutos, pois, quanto maior a quantidade de sólidos solúveis existentes, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionada a polpa, quando processados pela indústria, diminuindo, o custo de produção e aumentando a qualidade do produto.

2.3 – 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, a época da colheita, e da temperatura e umidade relativa do meio (CHITARRA, 1994).

Segundo CASTRO et al. (1998) a água contida nos alimentos é um meio excelente de transmissão de calor, sendo eficiente tanto para o resfriamento quanto para o aquecimento. Existem pelo menos dois tipos de água contida nos alimentos: a água livre e a água combinada. A água livre está fracamente ligada ao substrato, funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e reações químicas; e a água combinada, está fortemente ligada ao substrato, é de difícil eliminação, e não é utilizada como solvente nem para o crescimento e nem para reações químicas.

De acordo com RIBEIRO & SERAVALLI (2004) a água quando na quantidade, localização e estrutura adequada é essencial para o processo vital, influenciando na textura, na aparência, no sabor, na deterioração química e microbiológica dos alimentos. Portanto, quanto maior o teor de água de um alimento, maior é sua sensibilidade à deterioração.

Os conteúdos de umidade nos quais ocorre um aumento expressivo na taxa respiratória dos alimentos, estão próximos daqueles nos quais o aquecimento e a deterioração se iniciam no armazenamento (ATHIÉ et al., 1998).

O teor de água presente em qualquer alimento é muito importante para a determinação de procedimentos necessários para o processamento e armazenamento. É uma determinação difícil de ser executada, visto que os métodos usuais para sua quantificação envolvem a destilação da água presente no alimento e, com isso, outros compostos voláteis também são evaporados. Pode haver a caramelização de compostos

tipo açúcar e proteínas, além da degradação de outros componentes, em função da temperatura a que é submetida à amostra para a evaporação da água presente (OLIVEIRA, 1997).

A umidade corresponde à perda em peso sofrida pelo produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida. Na realidade, não é somente a água a ser removida, mas outras substâncias que se volatilizam nessas condições. O resíduo obtido no aquecimento direto é chamado de resíduo seco. O aquecimento direto da amostra a 105 °C é o processo mais usual (BRASIL, 2005).

2.4 - Propriedades termofísicas

É de extrema importância o conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais biológicos, para que haja o correto dimensionamento das instalações e dos equipamentos necessários para manipulação, transporte e estocagem de polpas de frutas e no retardamento dos processos metabólicos e microbiológicos (SARRIA & HONÓRIO, 2004).

De acordo com MOHSENIN (1980) muitos produtos agrícolas de origem vegetal ou animal são submetidos a vários tipos de processamento térmico antes de serem colocados para o consumo. Sendo que o processo térmico pode incluir aquecimento, resfriamento, secagem e congelamento.

As propriedades térmicas de alimentos podem ser consideradas praticamente constantes a temperaturas maiores do que o ponto de congelamento, por outro lado em temperaturas abaixo desse ponto, as propriedades mudam drasticamente devido a formação de gelo, o qual tem propriedades claramente diferentes da água (PASQUALONE & MASTANDREA, 1995).

Segundo ARAÚJO et al. (2004), o uso das equações de transferência de calor e massa é condicionado à disponibilidade de dados sobre as características termofísicas dos materiais. Estimativas de dispêndios e trocas energéticas podem ser realizadas a partir dos valores de massa específica, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica dos materiais.

2.4.1 - Massa específica

A massa específica de um determinado produto é a relação da massa por unidade de volume de uma substância, em uma determinada temperatura (Equação 1).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

m - massa (kg)

v - volume (m³)

A massa específica é um parâmetro importante para compreender o poder de solvatação de uma substância, nas diversas fases do solvente. Esta sofre influência direta da pressão e temperatura, aumentando com o aumento da pressão a temperatura constante e diminuindo com o aumento da temperatura, a pressão também constante (QUEIROZ, 1993).

Segundo SILVA et al. (1990) a massa específica serve para a caracterização, identificação e utilização de substância ou de materiais. Sendo que muitos processos químicos, como fermentação, são controlados através da medida desta propriedade termofísica.

A medida da massa específica pode ser aplicada para a determinação da concentração de soluções puras de açúcar em produtos açucarados, de álcool em bebidas alcoólicas, de sólidos solúveis em suco de tomate e em leite, de adulterações e textura de frutas (CECCHI, 1999).

Os dados da massa específica são necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos, tais como evaporadores, bombas, filtros e misturadores, e servem ainda como índice de qualidade do produto final (ALVARADO & ROMERO, 1989).

A densidade de partículas sólidas de alimentos pode ser determinada pelo deslocamento de ar ou deslocamento de líquidos (MOHSENIN, 1980). De acordo com Browne citado por RAPUSAS & DRISCOLL (1995), a utilização do método de deslocamento de líquido tem a vantagem de requerer equipamentos simples e de fácil acesso em laboratórios.

Pode-se utilizar diversos métodos para determinação da massa específica de líquidos, tais como: através do uso de picnômetros, hidrômetros, densímetros, lactodensímetros, balança de Westphal e dilatômetros. Estes se baseiam em alguns princípios como: no registro da massa de um volume determinado; no princípio de Arquimedes; no peso hidrostático de um bulbo imerso; e na medida do volume de uma massa do produto.

A determinação da massa específica em picnômetros é baseada na medida da massa da amostra em recipiente de volume conhecido, fornecendo resultados precisos, que são construídos e graduados de modo a permitir pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos, a uma dada temperatura. Da relação estabelecida entre as massas e os volumes resulta a massa específica dos mesmos à temperatura de determinação (BRASIL, 2005).

Também pode-se fazer a determinação da massa específica através de equações empíricas. Alguns pesquisadores sugerem equações para o cálculo da massa específica de produtos alimentícios baseadas em parâmetros da caracterização físico-química da amostra.

Kubota et al. (1980) citado por CHOI & OKOS (1986) desenvolveram a Equação 2 para prever a massa específica de soluções de açúcar em função dos sólidos totais (0 a 30%) e da temperatura (10 a 50°C).

$$\rho = 1098 + 4,26X_s - 0,349(T + 273) \quad (2)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

X_s - fração mássica dos sólidos (adimensional)

T - temperatura (°C)

A Equação 3 foi desenvolvida, por ALVARADO & ROMERO (1989), para o cálculo da massa específica da polpa de manga em função apenas da temperatura.

$$\rho = 1087 - 1,064T + 21,887 \cdot 10^{-3} T^2 - 26,160 \cdot 10^{-5} T^3 \quad (3)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

T - temperatura (°C)

ALVARADO & ROMERO (1989) desenvolveram a Equação 4, para estimar a massa específica de suco de frutas em geral, para o intervalo de temperatura entre 0 e 80 °C, e concentrações de 5 a 30 °Brix.

$$\rho = 1002 + 4,61B - 0,460T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3 \quad (4)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

T - temperatura (°C)

B - concentração (°Brix)

ARAUJO et al. (2002) sugeriram a Equação 5, para estimar a massa específica da polpa de cupuaçu.

$$\rho = 1035,3 - 0,07429T - 0,00643T^2 \quad (5)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

T - temperatura (°C)

RAMOS & IBARZ (1998) desenvolveram a Equação 6 para estimar o cálculo da massa específica do suco de pêsego.

$$\rho = 1006,56 - 0,5155T + 4,1951B + 0,0135B^2 \quad (6)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

T - temperatura (°C)

B - concentração (°Brix)

A Equação 7 foi desenvolvida por PEREIRA et al. (2002), para o cálculo da massa específica da polpa de açaí, em função da umidade e temperatura.

$$\rho = 1068,65 - 0,4579X_w - 0,3867T \quad (7)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

X_w - umidade (%)

T - temperatura (°C)

2.4.2 - Calor específico

Segundo LEWIS (1993) o valor do calor específico é significativamente afetado pela quantidade de água presente no material e pelo estado físico desta água. Conforme ALVARADO (1994) quando não existe mudança de fase ou reações involuntárias, o calor específico é a quantidade de calor que ganha ou perde um quilograma de alimento para produzir uma mudança de temperatura requerida, sendo escrito na forma da Equação 8.

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (8)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

Q - quantidade de calor (kJ)

m - massa (kg)

ΔT - variação de temperatura (°C)

Segundo MOHSENIN (1980) nos processos de transferência de calor, a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena; daí utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante. Para se determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento, é necessário que se conheça o valor do calor específico dos alimentos. O conhecimento desse valor nos processos contínuos pode ter influência sobre as dimensões dos equipamentos.

De acordo com RIBEIRO & SERAVALLI (2004) os altos valores das propriedades caloríficas da água são importantes nas operações de processamento de alimentos, como secagem e congelamento.

Alguns pesquisadores estudaram o comportamento do calor específico com a variação do teor de água de vários materiais biológicos e observaram existir uma relação

em que o aumento do teor de água provoca elevação dos valores de calor específico (ANDRADE et al., 2004; MOURA et al., 1998; SHARMA & THOMPSON, 1973).

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

De acordo com LEWIS (1993), o calor específico é reduzido drasticamente quando a água é congelada, pois esta tem um calor específico muito inferior 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 o alto conteúdo de água têm valores de calor específico aproximadamente a metade daquele obtido em seu estado fresco. Assim, necessita-se de uma menor energia para redução da temperatura do alimento de -1 a -30 °C com relação ao que se necessita para passar de -28 a -1 °C (muitos alimentos congelam em torno de -1 °C).

Existem muitos métodos para determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas, em que os mais conhecidos são: o método das misturas, o método das placas e o método do calorímetro diferencial de varredura (DSC).

O método das misturas consiste em que uma amostra com massa e temperatura conhecidas é introduzida em um calorímetro contendo água cuja massa e temperatura é conhecida e com a capacidade calorífica do calorímetro previamente determinada. A determinação da capacidade calorífica do calorímetro é feita através da equação do balanço de calor (Equação 9), descrita em SILVA et al. (2002).

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (9)$$

ou

$$C_{cal} = \frac{C_2 m_2 (T_3 - T_2) - C_1 m_1 (T_1 - T_3)}{m_1 (T_1 - T_3)} \quad (10)$$

em que:

C_1 e C_2 - calor específico da água (kJ/kg°C) ou (cal/g°C)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (cal/°C)

m_1 - massa de água à temperatura ambiente (kg) ou (g)

m_2 - massa de água refrigerada (kg)

T_1 - temperatura da água ambiente (°C)

T_2 - temperatura da água refrigerada (°C)

T_3 - temperatura do equilíbrio das águas ($^{\circ}\text{C}$)

O calor específico da amostra é determinado seguindo-se a equação de equilíbrio termodinâmico, entre o calor ganho ou perdido pelo calorímetro e aquele absorvido ou perdido pela amostra (Equação 11), descrita em SILVA et al. (2002).

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (11)$$

em que:

m_p - massa do produto (g)

m_3 - soma das massas m_1 e m_2 (g)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}$)

C_p - calor específico do produto ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)

C_1 - calor específico da água ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)

T_3 - temperatura do equilíbrio das águas ($^{\circ}\text{C}$)

T_4 - temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$)

T_5 - temperatura do equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$)

O método das placas é baseado no envolvimento da amostra por placas aquecidas eletricamente, sendo mantidas à mesma temperatura da amostra, que também é aquecida da mesma maneira. Desta maneira, teoricamente não existem perdas de calor, então, o calor cedido pelo produto em um tempo é igual ao ganho pelo mesmo (MOHSENIN, 1980).

O método do calorímetro diferencial de varredura (DSC), consiste em medir a energia requerida para estabelecer uma diferença de temperatura igual a zero entre o alimento e o material de referência, do qual se calcula o calor específico. A quantidade de amostra é mínima, logo o material deve ser cuidadosamente homogeneizado. Para melhorar a precisão, devem-se realizar várias repetições. Esses equipamentos conhecidos como DSC são complexos e de altos preços, conforme o modelo e a precisão que oferecem (ALVARADO, 2001).

Na literatura, existem diversas equações que predizem o calor específico de produtos alimentícios, sendo algumas delas de simples aplicação e que proporcionam valores próximos aos dados experimentais.

Siebel (1982) citado por CHOI & OKOS (1986) desenvolveu uma equação para o cálculo da determinação do calor específico, limitado a produtos alimentícios com umidade elevada e para temperaturas acima do congelamento (Equação 12).

$$C_p = (0,837 + 3,349 \cdot X_w) \quad (12)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

DICKERSON (1968) desenvolveu uma expressão (Equação 13) para determinação do calor específico em produtos alimentícios com alto teor de umidade. Essa equação pode ser aplicada para sucos de frutas com conteúdo de água acima de 50%.

$$C_p = 1,675 + 2,512X_w \quad (13)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

Lamb (1976) citado por CHOI & OKOS (1986) sugeriu um modelo baseado no teor de umidade de gêneros alimentícios para temperaturas acima do ponto de congelamento (Equação 14).

$$C_p = 1,465 + 2,721X_w \quad (14)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

A Equação 15 foi desenvolvida por MANOHAR et al. (1991) para o cálculo do calor específico do suco de tamarindo.

$$C_p = 4,18 + (6,839 \times 10^{-5} T - 0,0503) \cdot S \quad (15)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

S - sólidos totais (%)

T - temperatura (°C)

VIEIRA (1996) propôs a Equação 16 para estimar o calor específico teórico do suco de laranja.

$$C_p = 4,1713 - 0,02779 B \quad (16)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

B - concentração (°Brix)

2.4.3 - Difusividade térmica

A difusividade térmica é importante na determinação da evolução de sistemas que sofrem processos de aquecimento ou de resfriamento. Essa propriedade permite prever a velocidade da penetração de calor no interior do alimento, sendo assim de fundamental importância para o projeto de equipamentos e para o cálculo do processamento térmico. Para alimentos condutivos, a difusividade térmica controla a velocidade de propagação da frente de aquecimento (CARBONERA et al., 2003). A difusividade térmica está relacionada com a condutividade térmica (k), com o calor específico (C_p) e com a massa específica (ρ) pela Equação 17.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (17)$$

onde:

α - difusividade térmica (m²/s)

k - condutividade térmica (W/m°C)

ρ - massa específica (kg/m³)

C_p - calor específico (kJ/kg°C)

A difusividade é a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazenar calor, e em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transiente, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é submetido a uma situação de aquecimento ou resfriamento (LEWIS, 1993).

De acordo com ALVARADO (1994), a difusividade térmica é um dado importante em cálculos relacionados a processos onde ocorre transferência de calor variável com o tempo. A capacidade calórica volumétrica corresponde ao produto da densidade pelo calor específico, e por consequência é possível fazer a determinação indireta da condutividade térmica ao se conhecer a difusividade térmica e as outras propriedades indicadas.

A difusividade térmica pode ser determinada por métodos experimentais ou modelos matemáticos, dentre os quais se destacaram os procedimentos propostos por Dickerson, Carslaw & Jaeger e Schneider.

Utilizando condições de transferência de calor em regime transiente DICKERSON (1965) construiu um aparato experimental que requer apenas dados de tempo e temperatura que são necessários para os cálculos da difusividade térmica dos alimentos. Como a temperatura da amostra varia linearmente com o tempo, as dificuldades de satisfazer as condições de contorno são mínimas. Simultaneamente, a diferença de temperatura na qual a amostra é aquecida, permite o cálculo da difusividade térmica a partir de um único experimento (TELIS, 1992).

Segundo ARAUJO (2001) nesta metodologia as condições necessárias são satisfeitas quando o termo geral $\frac{\partial T}{\partial t}$, na equação de transferência de calor, é constante (Equação 18).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (18)$$

O aparelho de forma cilíndrica sugerido por DICKERSON (1965) permite a inserção dos termopares paralelos ao seu eixo ao longo de zonas de temperatura constante. Em coordenadas cilíndricas obtém-se a seguinte Equação 19:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (19)$$

Considerando-se $\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$ igual a zero, para um cilindro longo, isolado nas extremidades, e se não são permitidos gradiente de temperatura paralelos ao eixo dos cilindros. Então, devido à ausência de ΔT 's ao redor da circunferência, pode-se considerar que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0$$

Logo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (20)$$

Identificando a constante A, tem-se:

$$\frac{A}{\alpha} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (21)$$

A constante (A) é igual à velocidade de aquecimento em todos os pontos do cilindro. Como o gradiente da temperatura $\frac{\partial T}{\partial r}$ não é mais dependente do tempo, logo:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = \frac{A}{\alpha} \quad (22)$$

A solução será:

$$T = \frac{Ar^2}{4\alpha} + C_1 \ln(r) + C_2 \quad (23)$$

As condições de contorno a serem aplicadas na Equação 23, são:

$$T = A = T_s \quad (t > 0; r = 0) \quad (24)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad (t > 0; r = 0) \quad (25)$$

Conduzindo a Equação 26:

$$T_s - T_c = \frac{A}{4\alpha} (Rc^2 - r^2) \quad (26)$$

Considerando $r = 0$, tem-se:

$$T_s - T_c = \frac{ARc^2}{4\alpha} \quad (27)$$

Portanto,

$$\alpha = \frac{ARc^2}{4(T_s - T_c)} \quad (28)$$

em que:

α - difusividade térmica (m^2/s)

A - taxa constante de aquecimento ($^{\circ}C/s$)

Rc - raio do cilindro (m)

T_s - temperatura na superfície do cilindro de raio R ($^{\circ}C$)

T_c - temperatura no centro do cilindro ($^{\circ}C$)

Ao conhecer-se os parâmetros da Equação 28 torna-se possível determinar a difusividade térmica das amostras num espaço de tempo relativamente curto quando comparado ao método estacionário, que necessita alcançar o equilíbrio confirmando as vantagens do método de DICKERSON (1965).

Martens citado por SINGH (1982) desenvolveu um modelo para estimar a difusividade térmica com duas variáveis, água e temperatura, que são os dois fatores que mais afetam esta propriedade de vários alimentos (Equação 29).

$$\alpha = (0,057363X_w + 0,000288(T + 273)) \cdot 10^{-6} \quad (29)$$

em que:

α - difusividade térmica (m^2/s)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

T - temperatura ($^{\circ}K$)

RIEDEL (1969) propôs a Equação (30) para a determinação da difusividade térmica, sendo esta válida para alimentos com umidade acima de 40%, com erro em torno de 5%.

$$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) X_w \quad (30)$$

em que:

α - difusividade térmica (m^2/s)

α_w - difusividade térmica da água (m^2/s)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

VIEIRA (1996) utilizou o método de DICKERSON (1965) na determinação da difusividade térmica do suco de laranja, em diferentes concentrações, encontrando uma relação cúbica da difusividade térmica com a concentração (Equação 31).

$$\alpha = (1,4199 - 1,2637 \cdot 10^{-3} B + 5,5620 \cdot 10^{-5} B^2 - 1,4868 \cdot 10^{-6} B^3) \cdot 10^{-7} \quad (31)$$

em que:

α - difusividade térmica (m^2/s)

B - concentração ($^{\circ}Brix$)

2.4.4 - Condutividade térmica

De acordo com RAO & RIZVI (1994) a condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor. Nos alimentos, a condutividade térmica

depende principalmente da composição, mas também da presença de espaços vazios e de sua homogeneidade.

A condutividade térmica é um parâmetro fundamental em qualquer processo térmico, tanto para o dimensionamento de equipamentos quanto para a sua otimização e conservação de energia, bem como para caracterização de substâncias (PIETROBON et al., 1987).

A equação fundamental da transferência de calor, conhecida também como lei de Fourier para regime permanente, unidirecional, é dada pela Equação 32:

$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad (32)$$

em que:

q - massa específica de fluxo de calor (kJ/s)

k - condutividade térmica (W/m°C)

$\frac{dt}{dx}$ - gradiente de temperatura (°C/m)

O sinal negativo da Equação 32 indica que o fluxo está escoando na direção da diminuição do gradiente de temperatura.

A condutividade térmica é aproximadamente uma constante física para certa substância, identificando o número de calorías transferido por unidade de área perpendicular ao fluxo de calor, para cada grau de diferença de temperatura, através da amostra, e inversamente para cada unidade de comprimento na espessura da amostra, na direção do fluxo de calor (NEVES FILHO, 1991). Esta propriedade varia amplamente com os gases, os líquidos e os sólidos, devido as grandes diferenças nos mecanismos de transporte de calor nos três estados (FOUST et al., 1982).

Uma das propriedades mais difíceis de se estimar, em processos de congelamento, descongelamento e armazenagem a frio, é a condutividade térmica, pois esta depende fundamentalmente do teor de água. As localizações dos cristais de gelo influenciam a condutividade térmica, no entanto, as variações dependem da direção do fluxo de calor em relação as diferentes camadas de gelo, enquanto que durante o congelamento de alimentos a condutividade térmica cresce (DELGADO et al., 1997).

A condutividade térmica da água líquida é superior a de outros líquidos, enquanto que a condutividade térmica da água no estado sólido (gelo) a 0 °C equivale a

aproximadamente quatro vezes maior que o da água líquida na mesma temperatura, indicando que o gelo conduzirá energia térmica mais rapidamente que a água imobilizada (RIBEIRO & SERAVALLI, 2004).

De acordo com PARK et al. (1996), existem alguns métodos de determinação da condutividade térmica dentre eles está os métodos de estado estacionário, que podem ser divididos em: método das placas paralelas, método do cilindro concêntrico e método da esfera concêntrica. Estes três métodos requerem uma solução de equações de transferência de calor para um regime de estado estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas.

Para o método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. A razão constante de fluxo de calor, obtida após o equilíbrio, é medida para uma dada área seccional perpendicular ao fluxo e um gradiente de temperatura (FREIRE, 1981).

Para determinar a condutividade térmica através do método de estado variável, utiliza-se de uma fonte linear de calor para gerar um fluxo de calor constante na amostra, a qual deverá estar inicialmente em equilíbrio térmico (MOHSENIN, 1980).

Os métodos empíricos são muito utilizados na obtenção de dados para produtos alimentícios, os quais foram determinados por meio de equações. Estas equações foram desenvolvidas para a determinação da condutividade térmica, sendo algumas destas baseadas no teor de umidade, dos sólidos totais e na temperatura da amostra.

A Equação 33 apresentada por Kolarov & Gromov citado por SWEAT (1994) foi desenvolvida para suco de frutas.

$$K = 0,140 + 0,42X_w \quad (33)$$

em que:

K - condutividade térmica experimental (W/m°C)

X_w - fração mássica de água (%)

A Equação 34 apresentada por Riedel (1949) citado por CHOI & OKOS (1986) foi sugerida em função da temperatura e da umidade, limitada à faixa de 10 a 80 °C, com precisão de 1% de erro.

$$K = (326,58 + 1,0412T - 0,00337T^2).(0,46 + 0,54X_w)1,73.10^{-3} \quad (34)$$

em que:

K - condutividade térmica (W/m°C)

X_w - fração mássica de água (%)

T - temperatura (°C)

TELIS-ROMERO et al. (1998) sugeriram a Equação 35 para a determinação da condutividade térmica do suco de laranja não clarificado.

$$K = 0,0797 + 0,5238 \cdot X_w + 0,000580 \cdot T \quad (35)$$

em que:

K - condutividade térmica (W/m°C)

X_w - umidade (adimensional)

T - temperatura (°C)

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Localização do Experimento

Esta pesquisa foi realizada, no período de novembro de 2007 a março de 2008, no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEAg), do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN), pertencente à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no Campus I, situado em Campina Grande, PB.

3.2 - Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi figo-da-índia (*Opuntia ficus indica*) variedade amarela, colhidos em estágio de maturação maduro, provenientes do município de Boqueirão, Paraíba-PB.

3.2.1 - Processamento do figo-da-índia

Após a colheita, os frutos foram encaminhados ao laboratório, onde foi realizado o processamento conforme o fluxograma da Figura 3.



Figura 3 - Fluxograma do processamento do figo-da-índia

Os frutos foram selecionados manualmente em estágio de maturação maduro, descartando-se os frutos verdes, com injúrias mecânicas e com podridão. Após a seleção estes foram lavados em água corrente com o objetivo de eliminar sujeiras e resíduos aderidos nas frutas. Logo em seguida, os frutos foram imersos em recipiente contendo solução de hipoclorito de sódio com concentração de 20 ppm, durante 15 minutos e posteriormente enxaguados em água corrente para eliminar o resíduo do cloro.

Logo após, realizou-se o descascamento manual dos frutos com o auxílio de uma faca de aço inoxidável. O despulpamento foi realizado com o auxílio de uma despulpadeira mecânica horizontal. Posteriormente, pesou-se a polpa sem semente em balança semi-analítica, com precisão de 0,01g. A operação de embalagem da polpa foi realizada manualmente, com as amostras acondicionadas em sacos de polietileno de baixa densidade, com capacidade para 500 g cada. Em seguida foram imersas em nitrogênio líquido à temperatura de -196 °C para congelamento rápido. Após o congelamento a polpa foi armazenada em freezer à temperatura de aproximadamente -20 °C, onde permaneceram até o momento da realização dos experimentos.

3.3 - Sólidos solúveis totais (°Brix)

Os sólidos solúveis totais, expresso em °Brix, foram determinados através de leitura direta da polpa em refratômetro manual tipo ABBE, de marca Atago.

3.4 - Umidade e sólidos totais

A umidade e os sólidos totais da polpa de figo-da-índia foram determinados em estufa a 70 °C até peso constante, seguindo-se as normas do Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

3.5 - Propriedades termofísicas

3.5.1 - Massa específica

A determinação da massa específica da polpa de figo-da-índia integral foi realizada em sextuplicata, nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, utilizando-se picnômetros de 25 mL (Figura 4), previamente calibrados com água destilada.



Figura 4 – Picnômetro

O cálculo da determinação da massa específica foi realizado através da Equação 36.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (36)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

m - massa (kg)

v - volume (m³)

Para a determinação da massa específica teórica da polpa de figo-da-índia, foram utilizadas equações (Tabela 2) sugeridas por vários pesquisadores.

Tabela 2 – Equações para cálculo da massa específica em produtos alimentícios

Produto	Equação	Referência
Solução de açúcar	$\rho = 1098 + 4,26X_s - 0,349(T + 273)$	CHOI & OKOS (1986)
Polpa de manga	$\rho = 1087 - 1,064T + 21,887 \cdot 10^{-3} T^2 - 26,160 \cdot 10^{-5} T^3$	ALVARADO & ROMERO (1989)
Sucos de frutas em geral	$\rho = 1002 + 4,61B - 0,460T + 7,001 \cdot 10^{-3} T^2 - 9,175 \cdot 10^{-5} T^3$	ALVARADO & ROMERO (1989)
Polpa de cupuaçu	$\rho = 1035,3 - 0,07429T - 0,00643T^2$	ARAUJO et al. (2002)
Suco de pêssego	$\rho = 1006,56 - 0,5155T + 4,1951B + 0,0135B^2$	RAMOS & IBARZ (1998)
Polpa de açaí	$\rho = 1068,65 - 0,4579X_w - 0,3867T$	PEREIRA et al. (2002)

em que: ρ - massa específica (kg/m³); T - temperatura (°C); B - concentração (°Brix); X_w

- umidade (%); X_s - fração mássica dos sólidos (adimensional)

3.5.2 - Calor específico

A determinação do calor específico da polpa de figo-da-índia foi realizada através do método das misturas. Utilizou-se para tal um calorímetro construído com uma ampola de garrafa térmica comercial, com capacidade para 1.000 mL, envolvida por uma camada de 0,05 m de isolante térmico constituído de lã de vidro e tendo como invólucro um cilindro de PVC de 0,15 m de diâmetro (Figura 5). A ampola foi fechada com uma rolha de borracha, por meio da qual se introduziu a haste de um termopar com precisão de 0,1 °C.

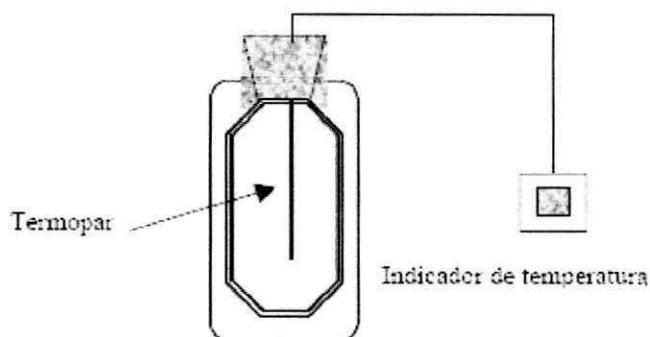


Figura 5 – Esquema do calorímetro de mistura

Inicialmente, foi realizada a estabilização do interior do calorímetro, adicionando-se água a temperatura ambiente (aproximadamente 27 °C). Em seguida, para a determinação da capacidade calorífica do calorímetro foi introduzido no calorímetro cerca de 400 g (m_1) de água destilada, com temperatura ambiente de aproximadamente 30 °C (T_1). A seguir, foi adicionado mais 400 g de água destilada (m_2) a uma temperatura de aproximadamente 15 °C (T_2), daí o calorímetro foi fechado e agitado lentamente para verificação da temperatura (T_3) de equilíbrio. Para determinar a capacidade calorífica do calorímetro, utilizou-se o balanço de calor da Equação 37.

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (37)$$

em que:

C_1 e C_2 - calor específico da água (kJ/kg°C) ou (cal/g°C)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (cal/°C)

m_1 - massa de água à temperatura ambiente (kg) ou (g)

m_2 - massa de água refrigerada (kg)

T_1 - temperatura da água ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 - temperatura da água refrigerada ($^{\circ}\text{C}$)

T_3 - temperatura de equilíbrio das águas ($^{\circ}\text{C}$)

Após atingir o equilíbrio térmico, foram introduzidas no calorímetro uma massa da amostra de aproximadamente 100 g (m_p) a temperatura ambiente de aproximadamente 30 $^{\circ}\text{C}$ (T_4). Logo em seguida agitou-se lentamente o calorímetro com o objetivo de homogeneizar a temperatura interna, e verificou-se a temperatura no equilíbrio (T_5) após 15 minutos. Na determinação do calor específico do produto, utilizou-se a Equação 38:

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (38)$$

em que:

m_p - massa do produto (g)

m_3 - soma das massas m_1 e m_2 (g)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}$)

C_p - calor específico do produto ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)

C_1 - calor específico da água ($\text{cal}/\text{g}^{\circ}\text{C}$)

T_3 - temperatura do equilíbrio das águas ($^{\circ}\text{C}$)

T_4 - temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$)

T_5 - temperatura do equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$)

Na determinação do calor específico teórico foram utilizadas as equações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Equações para o cálculo do calor específico de alimentos

Produto	Equação	Fonte
Geral	$C_p = 0,837 + 3,349X_w$	SIEBEL (1982)
Suco de frutas	$C_p = 1,675 + 2,512X_w$	DICKERSON (1968)
Geral para temperaturas acima do ponto de congelamento	$C_p = 1,465 + 2,721X_w$	CHOI & OKOS (1986)
Suco de tamarindo	$C_p = 4,18 + (6,839 \times 10^{-5} T - 0,0503) \cdot S$	MANOHAR et al. (1991)
Suco de laranja	$C_p = 4,1713 - 0,02779 B$	VIEIRA (1996)

em que: C_p – calor específico (kJ/kg°C); X_w – fração mássica da água (adimensional); B - sólidos solúveis totais (°Brix); S – sólidos totais (%); T – temperatura (°C)

3.5.3 - Difusividade térmica

A difusividade térmica da polpa de figo-da-índia foi determinada em triplicata, de acordo com a metodologia proposta por DICKERSON (1965). O equipamento utilizado para realização do experimento consistia em um cilindro metálico com 2,45 cm de raio interno e 23,0 cm de comprimento interno útil, com rolhas de nylon nas extremidades para vedação. O cilindro tinha dois termopares, um soldado à superfície externa e o outro inserido através do centro de uma das rolhas, de modo a aferir a temperatura no centro radial e em posição equidistante das extremidades.

Inicialmente o cilindro era preenchido com a polpa de figo-da-índia, adicionada de 1% de ágar para evitar a convecção natural. Em seguida o cilindro era imerso em banho termostático, onde era aquecido até a temperatura de 60 °C. As temperaturas na superfície e no centro do cilindro eram registradas em intervalos de 1 min. O esquema de funcionamento do aparato pode ser observado a partir da Figura 6.

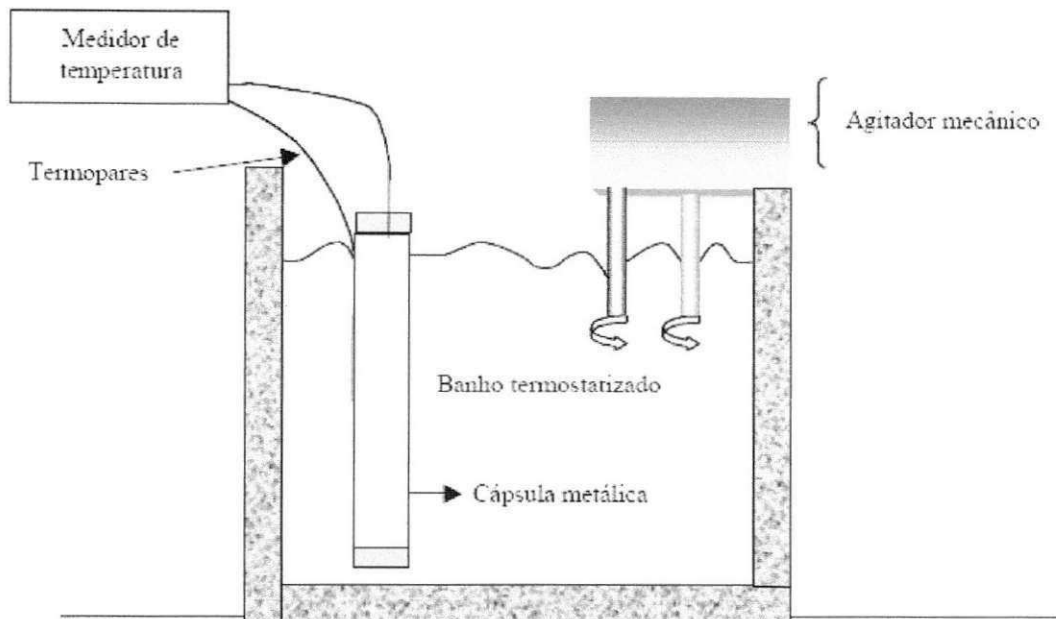


Figura 6 – Esquema utilizado para a determinação da difusividade térmica

Para os cálculos da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia utilizou-se a Equação 39.

$$\alpha = \frac{AR_c^2}{4(T_s - T_c)} \quad (39)$$

em que:

α - difusividade térmica (m^2/s)

A - taxa constante de aquecimento ($^{\circ}C/s$)

R_c - raio do cilindro (m)

T_s - temperatura na superfície do cilindro de raio R ($^{\circ}C$)

T_c - temperatura no centro do cilindro ($^{\circ}C$)

Os valores da constante de velocidade de aquecimento (A) e $(T_s - T_c)$, foram obtidos através da utilização do gráfico de temperatura (T_s e T_c) versus tempo, construído a partir dos dados experimentais. A constante da velocidade de aquecimento (A) do banho foi obtida através do coeficiente angular da reta representada no gráfico de temperatura (T_s) versus tempo e a diferença $(T_s - T_c)$ foi obtida quando as curvas (T_s) e (T_c) se tornaram paralelas entre si, o que acontece quando:

$$|(T_s - T_c)_i - (T_s - T_c)_{i+1}| \leq 0,1^{\circ}C \quad (40)$$

A difusividade térmica das amostras também foi estimada por meio de equações teóricas, apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Equações utilizadas no cálculo da difusividade térmica de produtos alimentícios

Produto	Equação	Referência
Geral	$\alpha = (0,057363X_w + 0,000288(T + 273)) \cdot 10^{-6}$	SINGH (1982)
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6})X_w$	RIEDEL (1969)
Suco de laranja	$\alpha = 1,4199 - 1,2637 \cdot 10^{-3}B + 5,5620 \cdot 10^{-5}B^2 - 1,4868 \cdot 10^{-6}B^3 \cdot 10^{-7}$	VIEIRA (1996)

em que: α - difusividade térmica (m^2/s); α_w - difusividade térmica da água (m^2/s); X_w - fração mássica da água (adimensional); T - temperatura ($^{\circ}K$); B - sólidos solúveis totais ($^{\circ}Brix$)

3.5.4 - Condutividade térmica

A condutividade térmica, em triplicata, da polpa de figo-da-índia foi determinada através da relação entre a difusividade térmica (α), o calor específico (C_p) e a massa específica (ρ), expressa através da Equação 41:

$$K = \alpha \rho C_p \quad (41)$$

em que:

K – condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$)

α – difusividade térmica (m^2/s)

ρ – massa específica (m)

C_p – calor específico ($kg/^{\circ}C$)

Os valores teóricos de condutividade térmica da polpa de figo-da-índia também foram calculados a partir de equações da literatura apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Equações para cálculo da condutividade térmica em alimentos

Produto	Equação	Referência
Suco de frutas	$K = 0,140 + 0,42X_w$	SWEAT (1994)
Geral, limitado a faixas de temperatura de 10 a 80°C.	$K = (326,58 + 1,0412T - 0,00337T^2) \cdot (0,46 + 0,54X_w) \cdot 1,73 \cdot 10^{-3}$	CHOI & OKOS (1986)
Suco de laranja	$K = 0,0797 + 0,5238 \cdot X_w + 0,000580 \cdot T$	TELIS-ROMERO et al. (1998)

em que: K - condutividade térmica experimental (W/m°C); X_w - fração mássica de água (%); T - temperatura (°C)

3.6 - Análise estatística

A realização da análise estatística dos dados massa específica foi feita utilizando-se o programa ASSISTAT (SILVA & AZEVEDO, 2002). Os valores da massa específica foram avaliados utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, com comparação entre médias pelo teste de Tukey. Foi realizada a regressão na análise de variância para representar o comportamento da massa específica em função da temperatura.

3.7 - Erro Percentual

O erro percentual (Equação 42) foi utilizado para avaliar a precisão dos ajustes obtidos através das equações propostas na literatura em relação aos valores determinados experimentalmente das propriedades termofísicas da polpa de figo-da-índia.

$$\text{Erro}(\%) = \left| \frac{V_{\text{cal}} - V_{\text{exp}}}{V_{\text{exp}}} \right| \times 100 \quad (42)$$

em que:

V_{exp} – valor experimental

V_{cal} – valor calculado

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Sólidos solúveis totais (°Brix)

Os valores dos sólidos solúveis totais (°Brix) da polpa de figo-de-índia integral, a média, o desvio padrão e coeficientes de variação (CV), estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Sólidos solúveis totais (°Brix) da polpa de figo-da-índia

Repetições	Sólidos solúveis totais (°Brix)
1	12,75
2	12,75
3	12,75
4	12,75
5	12,75
Média	12,75
Desvio padrão	0
Coef. de variação (%)	0

4.2 – Umidade e sólidos totais

Na Tabela 7 são apresentados os valores experimentais das repetições da umidade e dos sólidos totais da polpa de figo-da-índia com os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação (CV). O coeficiente de variação (CV) obtido foi inferior a 0,3%, sendo satisfatório de acordo com STORCK et al. (2000) que considera o valor de CV inferior a 10% baixo e de alta precisão experimental.

Tabela 7 - Valores dos sólidos totais e da umidade da polpa de figo-da-índia

Repetições	Umidade (%)	Sólidos totais (%)
1	84,0596	15,9404
2	84,1235	15,8765
3	84,0581	15,9419
4	84,1022	15,8978
Média	84,0858	15,9142
Desvio Padrão	0,03	0,03
Coef. de Variação (%)	0,04	0,20

4.3 - Propriedades termofísicas

4.3.1 - Massa específica

Os valores experimentais das repetições obtidos para a massa específica da polpa de figo-da-índia em cinco diferentes temperaturas e os valores médios são apresentados na Tabela 8. Verifica-se que ocorreu uma redução da massa específica com o aumento da temperatura.

Tabela 8 - Massa específica (kg/m^3) da polpa de figo-da-índia integral em diferentes temperaturas

Temp. (°C)	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	Média	Desvio Padrão	CV (%)
10	1054,49	1054,42	1054,64	1054,92	1054,32	1055,10	1054,64	0,31	0,03
20	1049,12	1048,46	1048,79	1048,15	1048,94	1048,31	1048,63	0,38	0,04
30	1042,07	1041,87	1041,58	1040,98	1041,24	1041,37	1041,52	0,41	0,04
40	1026,78	1026,75	1026,10	1026,82	1027,50	1029,07	1027,17	1,03	0,10
50	1026,16	1026,44	1025,67	1025,33	1025,81	1025,14	1025,76	0,49	0,05

CV: Coeficiente de variação

O resultado da análise de variância referente aos valores da massa específica da polpa de figo-da-índia para as diferentes temperaturas, é apresentado na Tabela 9. Observa-se que para fonte de variação estudada (temperatura), os resultados obtidos tiveram efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 9 - Análise de variância dos valores da massa específica da polpa de figo-da-índia

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Temperatura	4	3945,2660	986,3165	2888,4190 **
Resíduo	25	8,5368	0,3415	
Total	29	3953,8028		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios da massa específica da polpa de figo-da-índia em diferentes temperaturas. Verifica-se que os valores da massa específica diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Os valores obtidos da massa específica diminuíram com o aumento da temperatura, apresentando na menor temperatura (10°C) um valor de 1054,64 kg/m³ e para a maior temperatura (50°C) um valor de 1025,76 kg/m³. ARAÚJO et al. (2002) ao determinarem a massa específica da polpa de cupuaçu integral nas temperaturas entre 10 a 50 °C encontraram valores variando entre 1034,3 e 1015,3 kg/m³, sendo inferiores ao da polpa de figo-da-índia.

Tabela 10 – Valores médios da massa específica da polpa de figo-da-índia em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m ³)
10	1054,6440 a
20	1048,6260 b
30	1041,5170 c
40	1027,1700 d
50	1025,7580 e

MG = 1039,5431 kg/m³; DMS = 0,99; CV (%) = 0,06

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade

A análise de variância da regressão polinomial da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura é apresentada na Tabela 11. Verifica-se que as

equações de regressão linear e cúbica foram significativas a de 1% de probabilidade pelo teste F e equação quadrática foi significativa a 5% de probabilidade.

Tabela 11 - Análise de variância das regressões polinomiais da massa específica da polpa de figo-da-índia integral em função da temperatura

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão linear	1	3766,1505	3766,1505	11029,1381**
Regressão quadrática	1	1,6689	1,6689	4,8873*
Regressão cúbica	1	118,0596	118,0596	345,7366 **
Regressão de 4º Grau	1	59,3869	59,3869	173,9141 -
Temperatura	4	3945,2660	986,3165	2888,4190**
Resíduo	25	8,5368	0,3415	
Total	29	3953,8028		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < .05$); ns - não significativo

G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do Teste

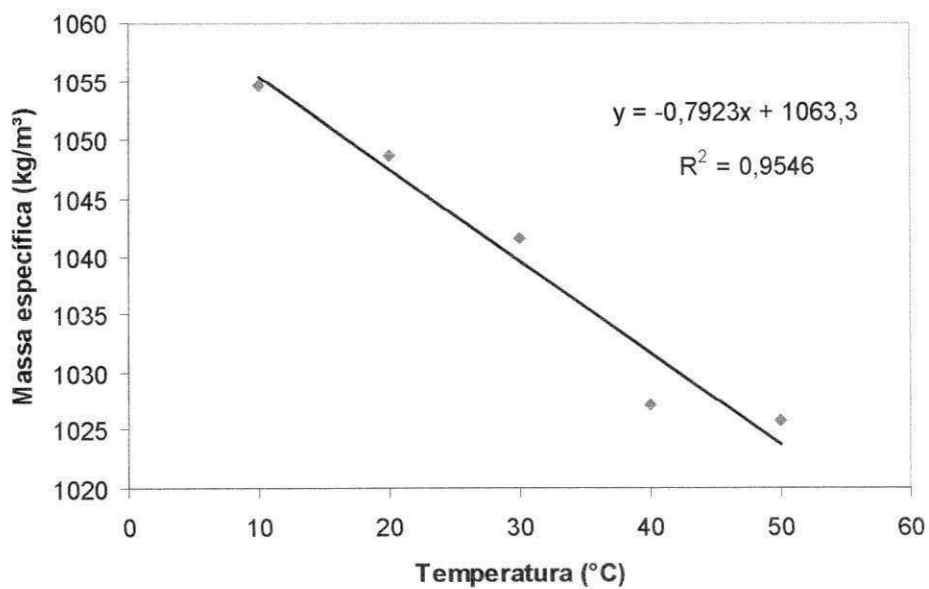
Na Tabela 12 tem-se as equações linear e cúbica para o cálculo da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura. Observa-se que as equações propostas resultaram em excelentes ajustes, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,95, podendo-se utilizar qualquer uma na estimativa da massa específica da polpa de figo-da-índia. DUARTE et al. (2003) ao trabalharem com polpa de mangaba sugeriram uma equação linear para estimar a densidade em função da temperatura com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,977.

Tabela 12 - Equações propostas para o cálculo da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura

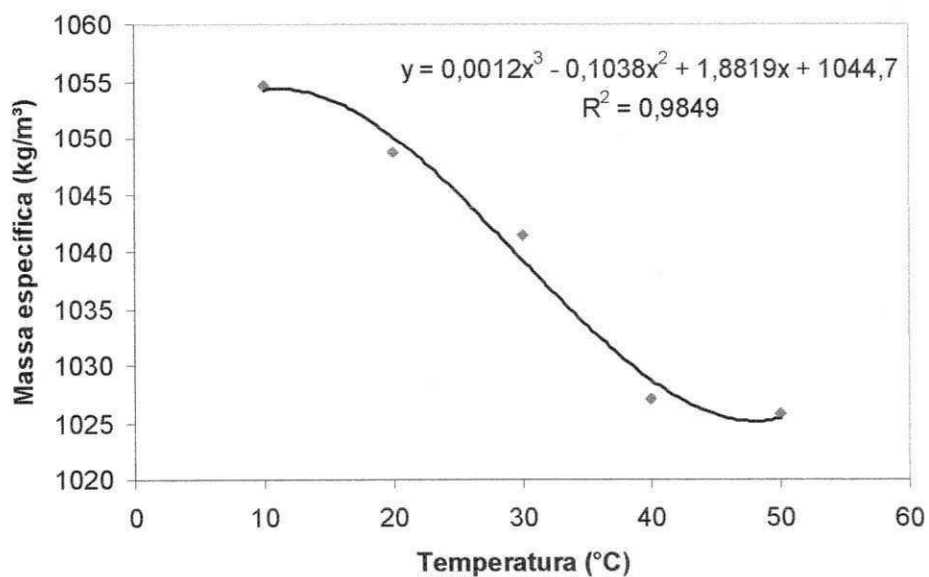
Equações**	R^2
$\rho = 1063,3112 - 0,7923T$	0,955
$\rho = 1044,6596 + 1,8819T - 0,1038T^2 + 0,0011689T^3$	0,985

onde: ρ - densidade (kg/m^3); T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

Na Figura 7 tem-se a representação gráfica dos valores experimentais da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura e os valores teóricos preditos pelas equações linear e cúbica.



(a) Equação linear



(b) Equação cúbica

Figura 7 – Valores experimentais e teóricos da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura

Os valores teóricos da massa específica calculados por equações de diferentes autores, estão representados na Tabela 13. Verifica-se que os erros percentuais calculados a partir dos valores teóricos da massa específica em relação aos valores experimentais para as equações propostas por Kubota, Alvarado & Romero, Araújo et al., Ramos & Ibarz e Pereira et al. são inferiores a 3,5%, sendo considerados satisfatórios, podendo ser usados na estimativa da massa específica da polpa de figo-da-índia.

Tabela 13 - Valores teóricos da massa específica (kg/m^3) para a polpa de figo-da-índia integral, calculados a partir de equações propostas em literatura e erro percentual

Equações	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				
	10	20	30	40	50
Soluções de açúcar (KUBOTA, 1980)	1019,4072	1015,9172	1012,4272	1008,9372	1005,4472
Erro (%)	3,34	3,12	2,79	1,78	1,98
Polpa de manga (ALVARADO & ROMERO, 1989)	1078,2871	1072,3820	1067,7151	1062,7168	1055,8175
Erro (%)	2,24	2,27	2,52	3,46	2,93
Sucos de frutas em geral (ALVARADO & ROMERO, 1989)	1033,9141	1031,2422	1027,2843	1022,0404	1015,5105
Erro (%)	1,97	1,66	1,37	0,50	1,00
Polpa de cupuaçu (ARAÚJO et al., 2002)	1055,6334	1052,4914	1049,6487	1046,5546	1042,6588
Erro (%)	0,09	0,37	0,78	1,89	1,65
Suco de pêssego (RAMOS & IBARZ, 1998)	1055,9531	1050,7981	1045,6431	1040,4881	1035,3331
Erro (%)	0,12	0,21	0,40	1,30	0,93
Polpa de açaí (PEREIRA et al., 2002)	1026,2801	1022,4131	1018,5461	1014,6791	1010,8121
Erro (%)	2,69	2,50	2,21	1,22	1,46

Os valores experimentais e os valores teóricos da massa específica da polpa de figo-da-índia em função da temperatura estão representados na Figura 8. Pode-se observar

a diminuição da massa específica com o aumento da temperatura. As equações de ARAUJO et al. (2002), PEREIRA et al. (2002) e de CHOI & OKOS (1986) subestimaram os valores da massa específica, enquanto as equações de RAMOS & IBARZ (1998) e ALVARADO & ROMERO (1989) superestimaram. A equação que resultou nos valores teóricos da massa específica mais próximos dos valores experimentais, foi a proposta por RAMOS & IBARZ (1998), exceto para a temperatura de 40 °C.

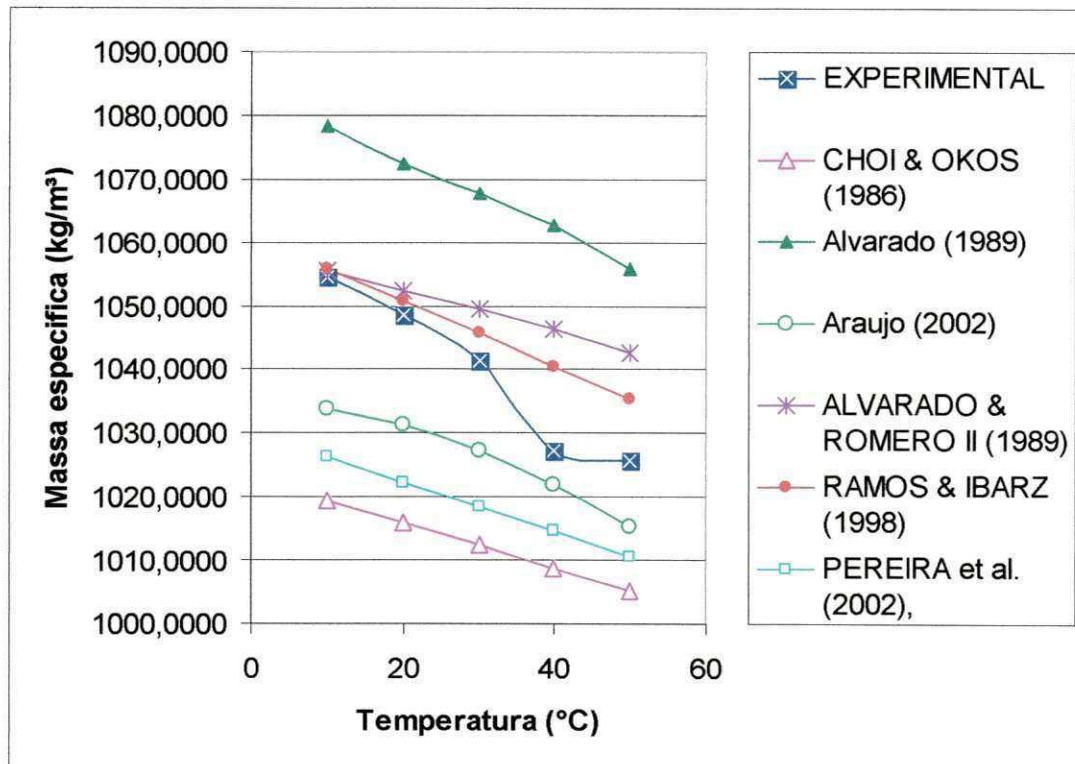


Figura 8 – Valores teóricos da massa específica em função da temperatura preditos por equações da literatura, para polpa de figo-da-índia

4.3.2 - Calor específico

Na Tabela 14 têm-se os valores experimentais do calor específico da polpa de figo-da-índia determinados em três repetições (R_1 a R_3). Verifica-se que o coeficiente de variação (CV) foi menor do que 10%, sendo considerado baixo e que o experimento foi de boa precisão, de acordo com a classificação de STORCK et al. (2000). O valor médio do calor específico da polpa de figo-da-índia é superior ao obtido por ALVARADO (1994) que foi de 2,962 kJ/kg °C para polpa de banana, e próximo aos valores obtidos por

MOURA et al. (2001) para suco de laranja com teores de sólidos totais de 15,44 e 15,52%, que foi de 3,5212 e 3,5028 kJ/kg °C, respectivamente.

Tabela 14 - Valores experimentais do calor específico da polpa de figo-da-índia

Repetições	Calor específico (kJ/kg °C)
R₁	3,60
R₂	3,67
R₃	3,65
Média	3,64
Desvio Padrão	0,04
CV (%)	1,03

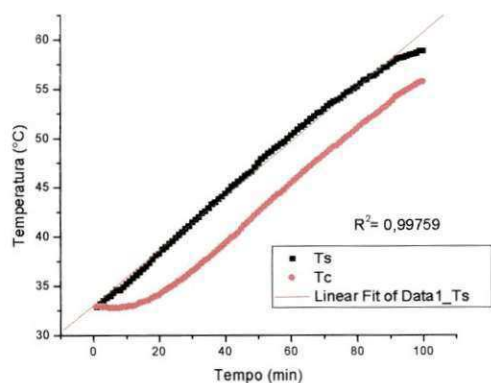
Na Tabela 15 são mostrados os valores médios do calor específico, determinados a partir de equações propostas por vários pesquisadores e os erros percentuais em relação ao valor experimental do calor específico da polpa de figo-da-índia. Ao analisar os resultados das equações testadas verifica-se que a de SIEBEL (1982) apresentou o menor erro, com o valor de 0,75%. Portanto, como todos os erros deram valores inferiores a 10%, recomenda-se o uso destas equações na estimativa dos dados do calor específico da polpa de figo-da-índia.

Tabela 15 - Valores teóricos do calor específico para a polpa de figo-da-índia e os erros percentuais

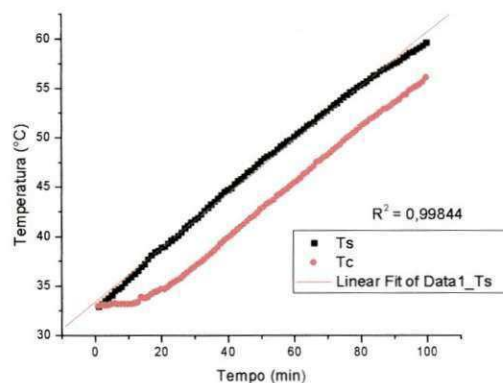
Equação	Calor específico (kJ/kg °C)
DICKERSON (1968)	3,7869
Erro (%)	4,05
SIEBEL (1982)	3,6526
Erro (%)	0,75
CHOI & OKOS (1986)	3,7526
Erro (%)	3,11
MANOHAR et al. (1991)	3,4116
Erro (%)	6,26
VIEIRA (1996)	3,8170
Erro (%)	4,88

4.3.3 - Difusividade térmica

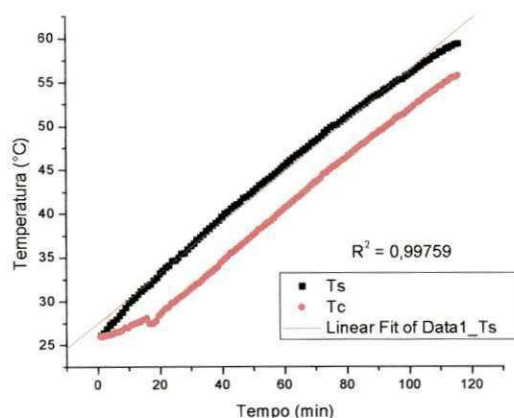
Na Figura 9 têm-se os diagramas temperatura versus tempo para cada experimento realizado (triplicata), utilizados para o cálculo da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia. Foram obtidos valores de coeficiente de determinação para a equação linear superiores a 0,997 para todos os experimentos.



(a) Experimento I



(b) Experimento II



(c) Experimento III

Figura 9 - Diagrama temperatura versus tempo dos três experimentos para a determinação da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia

Os valores das três repetições para a difusividade térmica da polpa de figo-da-índia estão apresentados na Tabela 16. Observa-se que o valor do coeficiente de variação mostrou-se inferior a 10%, indicando um experimento de alta precisão, de acordo com STORCK et al. (2000). Os valores de difusividade térmica determinados experimentalmente de $1,5369 \times 10^{-7}$ a $1,5707 \times 10^{-7}$ m²/s encontram-se dentro da faixa de

valores obtidos por ALVARADO et al. (1994), para a polpa de mamão, e por BHOWMIK & HAYAKAWA (1979) para a polpa de maçã e tomate, os quais obtiveram resultados de difusividade térmica que variam de $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. A difusividade térmica média da polpa de figo-da-índia foi inferior ao valor determinados por MUNIZ et al. (2006) para a polpa de bacuri com 7,5 °Brix que foi de $1,763 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 16 - Valores experimentais da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia

Difusividade térmica (m^2/s)	
R ₁	$1,5369 \times 10^{-7}$
R ₂	$1,5432 \times 10^{-7}$
R ₃	$1,5707 \times 10^{-7}$
Média	$1,5503 \times 10^{-7}$
Desvio padrão	$0,0180 \times 10^{-7}$
CV (%)	1,16

Os valores da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia, calculados a partir de equações apresentadas em literatura, e os erros em relação às determinações experimentais, estão apresentados na Tabela 17. Pode-se observar que a equação de RIEDEL (1969) resultou no menor erro percentual, com valor abaixo de 4,0%. A equação de SINGH (1982) apresentou erro acima de 13%, devendo ser evitada o seu uso da predição da difusividade térmica da polpa de figo-da-índia.

Tabela 17 - Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa de figo-da-índia e os erros percentuais

Equação	Difusividade térmica (m^2/s)
SINGH (1982)	$1,3549 \times 10^{-7}$
Erro (%)	13,11
RIEDEL (1969)	$1,6202 \times 10^{-7}$
Erro (%)	3,90
VIEIRA (1996)	$1,4097 \times 10^{-7}$
Erro (%)	9,59

4.3.4 - Condutividade térmica

Na Tabela 18 são mostrados os valores da condutividade térmica da polpa de figo-da-índia calculados a partir de dados experimentais, pode-se observar que o coeficiente de variação foi inferior a 10% sendo considerado como baixo e que o experimento foi de alta precisão (STORCK et al., 2000).

Tabela 18 - Valores experimentais da condutividade térmica da polpa de figo-da-índia

Condutividade térmica (W/m °C)	
R ₁	0,4956
R ₂	0,5079
R ₃	0,5132
Média	0,5056
Desvio padrão	0,0091
CV (%)	1,79

Na Tabela 19 são mostrados os valores médios da condutividade térmica, determinadas através de equações propostas por vários pesquisadores e seus respectivos erros percentuais em relação ao valor experimental da condutividade térmica da polpa de figo-da-índia. Observa-se que o menor erro percentual foi o obtido com a equação proposta por Kolarov & Gromov, com o valor de 2,47%. A equação de Riedel apresentou erro superior a 10%, podendo ser considerada de média precisão.

Tabela 19 - Valores teóricos da condutividade térmica (W/m °C) da polpa de figo-da-índia e os respectivos erros percentuais

Equação	Condutividade térmica (W/m °C)
KOLAROV & GROMOV	0,4931
Erro (%)	2,47
RIEDEL (1949)	0,5610
Erro (%)	10,96
TELIS-ROMERO et al. (1998)	0,5375
Erro (%)	6,30

5 - CONCLUSÕES

- Os valores médios obtidos da umidade, sólidos totais e sólidos solúveis totais da polpa de figo-da-índia integral foram 84,09%, 15,91% e 12,75 °Brix, respectivamente.

- A massa específica da polpa de figo-da-índia integral diminuiu com o aumento da temperatura entre 10 e 50 °C, podendo ser estimada por equação linear e cúbica com coeficientes de determinação superiores a 0,95. Dentre as equações testadas a de Ramos e Ibarz foi a que estimou com maior precisão a massa específica da polpa de figo-da-índia integral, apresentando erro inferior a 1,5%.

- O calor específico experimental da polpa de figo-da-índia integral foi em média de $3,599 \pm 0,074$ kJ/kg °C. A equação de Siebel pode ser utilizada para estimar o calor específico da polpa de figo-da-índia integral, com erro percentual inferior a 1%.

- A difusividade térmica da polpa de figo-da-índia foi de $1,55 \times 10^{-7}$ m²/s., podendo ser estimada pela equação proposta por Riedel com erro inferior a 4%.

- A condutividade térmica da polpa de figo-da-índia foi de 0,5056 W/m °C, podendo ser melhor predita pela equação de Kolarov e Gromov, com erro inferior a 2,5%.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, S.G. de; SANTOS, D. A.; SAMPAIO, E. V. S. B. (Eds.). A palma forrageira. In: KIILL, L. H. P. ; MENESES, E. A. (Eds.). **Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o semi-árido brasileiro**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. cap. 3, p. 91-127.

ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H. Physical properties of fruits: I –II. Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature. **Latin American Applied Research**, Bahía Blanca, v. 19, n. 15, p. 15-21, 1989.

ALVARADO, J. D. Propriedades físicas de fruta. IV. Difusividad y conductividade térmica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**, Bahia Blanca, v. 24, n. 1, p. 41-47, 1994.

ALVARADO, J. D. Calor específico. In: ALVARADO, J. D.; AGUILERA, J. M. **Métodos para medir propiedades físicas em industrias de alimentos**. Zaragoza: Acribia, 2001. p. 189-212.

ANDRADE, E. T.; COUTO, A. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.

ARAÚJO, J. L. **Determinação das propriedades termofísicas da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum schum.*)**. 2001. 19 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Campina Grande (UFCG). Campina Grande

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum.*) sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 127-134, 2002.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004.

ASKAR, A.; EL-SAMAHY, S. K. Chemical composition of prickly pear fruits. **Deut Lebensm-Rundsch**, v. 77, p.279-281, 1981.

ATHIÉ, I; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T. **Conservação de Grãos**. Campinas: ITAL, p. 236, 1998.

BARBERA, G. História e importância econômica e agroecológica. In: BARBERA, G.; INGLESE, P.; BARRIOS, E. P. **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. Paraíba: SEBRAE, 2001. cap. 1, p. 1-11.

BHOWMIK, S. R.; HAYAKAMA, K. I. A new method for determining the apparent thermal diffusivity of thermally conductive food. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 2, 1979.

BRAND, **Catálogo On-line**. Fotografia Disponível em: catalog.brand.de/index.php Acesso em: 14 nov. 2007.

BRASIL. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1017 p.

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

CASTELAZO, T. **Prickly pears**. 2006. 1. Fotografia, color. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Prickly_pears.jpg Acesso em: 1 abr. 2008.

CASTRO. F. A. F.; AZEVEDO, R. M. C.; SILVEIRA, I. L. **Estudo experimental dos alimentos**. Viçosa, Ed. UFV, 7-17 p., 1998.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análises de alimentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 1999. 212p.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL/FAEPE, p. 293, 1990.

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: transport phenomena**. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. v. 1, cap. 9 p. 93-101.

DEIRÓ, T. et al. **A Palma: alimento alternativo**. Recife: [s.n.], 2003. 24p

DELGADO, A. E.; GALLO, A.; PIANTE, D.; RUBIOLO, A. Thermal conductivity of unfrozen and frozen strawberry and spinach. **Journal of Food Engineering**, v. 31, p. 137-146, 1997.

DICKERSON, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, Westport, v. 19, n. 52, p. 880-886, 1965.

DICKERSON, R.W. **Thermal properties of foods the freezing preservation of foods**. 4th ed. Westpoint: The AVI Publishing Company, v. 2, 1968.

DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; PAIVA, B. R. Propriedade termofísicas da polpa de mangaba a baixas e ultra-baixas temperaturas: densidade e calor específico. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Especial, n.1, p.19-29, 2003.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 670.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. 1981. 122 p. M. Sc. Thesis - Cranfield Institute of Technolog, National College of Agricultural Engineering.

GRANGEIRO, A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA, M. E. R. M. C., Viscosidades de Polpas Concentradas de Figo-da-Índia. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 219-224, 2007.

HOFFMANN, W. Etnobotânica. In: BARBERA, G.; INGLESE, P.; BARRIOS, E.P. (Eds.). **Agroecologia, cultivo e uso da palma forrageira**. Paraíba: Sebrae/PB, 2001. p.12-19 (Estudo da FAO em Produção e Proteção Vegetal, 132).

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

LOPES, R.V.V. **Estudo da Produção do Vinho do Fruto da Palma Forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill)**. Campina Grande, 2005, 95p.

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

MOBHAMMER, M.R., STINTZING, F.C., CARLE, R., 2005. Development of a process for the production of a betalain-based colouring foodstuff from cactus pear. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 6, p. 221-231.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach Sci. Publishers, 1980. 407 p.

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

MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos – Parte I. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 2003.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ A. J. M., FIGUEIREDO, R. M. F. Caracterização termofísicas de polpa de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 360-368, 2006.

NAKA, J. **A diversidade das frutas brasileiras**. Brasília: PROFRUTA/ MAPA, 2002. 19p.

NEVES FILHO, L. C. **Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos**. São Paulo: IGF/ABRAVA/SINDRATAR, 1991. p. 176.

OLIVEIRA, R. P. S. **Determinação das propriedades físicas e de transporte de suco de acerola**. 148 p. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.

PARK, K. J., MURR, F. E. X., SALVADEGO, M. **Construção de um sistema de medição da condutividade térmica pelo método da sonda linear**. Sociedade Brasileira de Ciência e tecnologia de Alimentos. Campinas, 1996.

PASQUALONE, S.; MASTRANDEA, N. Le proprietá termiche degli alimenti congelati. **Industrie Alimentaria**, v. 34, n. 3, p. 261-267, 1995.

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

PIETROBON, C. L. R.; PEREIRA, N. C. E; FREIRE, J. T. Determinação da condutividade térmica: I – análise experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 15, 1987, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1987. v. 1, p. 150-161.

PIMIENTA-BARRIOS, E. **El nopal tunero**. 1. Ed. México: Universidad de Guadalajara, Editora Jalisco, 1990. 246p.

QUEIROZ, F. **Estudo da cinética de extração do óleo essencial de capim - limão com dióxido de carbono líquido**. Campinas: UNICAMP, 1993. 70p. (Dissertação de Mestrado).

RAMOS, A. M.; IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 35, n. 1, p. 57-63, 1998.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, p. 531, 1994.

RAPUSAS, R. S.; DRISCOLL, R. H. Thermophysical properties of and dried white onion slices. **Journal of food engineering**, Local, v. 30, n. 24, p. 149-164, 1995.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de alimentos**. São Paulo: Edgard Blücher/Instituto Mauá de Tecnologia, 2004. 184 p.

RIEDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water. **Kaltetechnik-Klimatisierung**, v. 21, n. 11, p. 315, 1969.

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

SÁENZ, C.; ESTÉVEZ, A. M.; SEPÚLVEDA, E.; MECKLENBURG, P. **Plant Foods for Human Nutrition (Formerly *Qualitas Plantarum*)**, v.52, n.2, junho/1998, p.141-149.

SANTOS, D.C., ALBUQUERQUE, S.G., 2002. Opuntia as fodder in the semiarid northeast Brazil. In: Mondragón-Jacobo, C., Pérez-González, S. (Eds.), **Cactus (Opuntia spp) as forage. FAO Plant Protection and Production Paper**, v. 169, p. 37-50. Rome, Italy.

SARRIA, S.D. ; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “Roxo de Valinhos”, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.185-194, 2004.

SCHEINVAR L. (1985). **Cactacea**. In: Jerzy Rzedowski and de Rzedowski, G.C. (eds), Flora fanerogâmica del Valle de México. Vol. II Dicotyledoneae. México DF: Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-Instituto Politécnico Nacional-Instituto de Ecológica. pp. 93-134.

SHARMA, D. K.; THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973.

SIEBEL, J. E. Specific heat of various products. **Ice refrigeration**, v. 2, p. 256-257, 1982.

SILVA, R. R.; BOCCHI, N.; ROCHA FILHO, R. C. **Introdução a química experimental**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990. 296p.

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

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SIMÕES, D.A.; SANTOS, D. C.; DIAS, F. M. **Introdução da palma forrageira no Brasil**. In: MENEZES, R. S. C. ; SIMÕES, D. A. ; SAMPAIO, E. V. S. B.(Eds.). A palma no nordeste do Brasil. : conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. p. 13-26.

SINGH, P. Thermal diffusivity in food processing. **Food Technology**, v. 36, p. 87-91, 1982.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introducción a la Ingeniería de los Alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1997. 544p.

STORCK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação vegetal**. Santa Maria: UFSM, 2000. 198 p.

SWEAT, V. E. Thermal properties of food In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1994. cap. 3, p. 99-138.

TELIS, J. R. **Hidrodinâmica e transferência de calor do escoamento laminar de fluidos não-newtonianos em tubos**. 1992. Tese (Doutorado Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. Thermophysical properties of brasilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 38, n. 1, p. 27-40, 1998.

University of Arizona Pima County Cooperative Extension. Fotografia, Disponível em: < http://ag.arizona.edu/pima/gardening/aridplants/Opuntia_ficus-indica.html > Acesso em: 14 nov. 2007.

VIEIRA, J.A.G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos**. 87 p. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas.