

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ALIMENTOS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

PAULA CAROLINE ROSA

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA CASCA DO MARACUJÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2015

PAULA CAROLINE ROSA

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA CASCA DO MARACUJÁ

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia de Alimentos, do Departamento Acadêmico de Alimentos – DALIM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bogdan Demczuk
Junior

CAMPO MOURÃO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão

Departamento Acadêmico de Alimentos
Engenharia de Alimentos



TERMO DE APROVAÇÃO

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA CASCA DO MARACUJÁ

por

PAULA CAROLINE ROSA

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado dia 25 de novembro de 2015, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Bogdan Demczuk Junior

Prof^a. Dr^a. Stephani Caroline Beneti

Prof. Dr. Odinei Hess Gonçalves

Nota: O documento original e assinado pela banca examinadora encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos da UTFPR campus Campo Mourão

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao meu anjo da guarda, por todas as bênçãos e proteções concedidas durante toda a caminhada até aqui. As minhas tias queridas e amadas Sirlene Gerin Rosa e Emília Candida Rosa que em vida sempre me incentivaram, mas que se tornaram um anjo durante esse trajeto e deixaram uma imensa saudade.

Agradeço a minha amada mãe Lucia Margarete Linari Rosa, meu amado pai João Jacinto Rosa e minha irmã e amiga Carla Monielly Rosa, por todo amor e incentivo recebido durante essa jornada.

Aos meus avós, Luiza Bordin Linari e José Hidalgo Linari, e ao meu tio, minhas tias e meus primos por todo o estímulo, confiança e carinho. Mesmo distantes, sempre estiveram perto em pensamentos e orações.

Aos meus amigos queridos e amados que fiz em Campo Mourão e se tornaram irmãos durante a graduação, Isadora Prado Tavares, Tamires Barlati, Nathália Bertoto, Lucas Soares, Thiago Sadao, Gustavo Makimori, Giovani Schuroff e Sara Castro muito obrigada por tudo, não poderia ter seguido sem vocês até aqui. Aos amigos do Ômega, Matheus Hernandez, Danilo Malacoski, Thiago Hashimoto, Rafael Perbeline, Rafael de Pauli, Larissa Venturini, Maria Elisa e Guilherme Miotto, que se tornaram uma família do coração.

Aos meus amigos de Fernandópolis, Cardoso e minha amiga Débora Garcia, agradeço por permanecerem em minha vida durante todos esses anos.

Ao meu orientador Professor Dr. Bogdan Demczuk Junior, pela paciência, carinho, dedicação, profissionalismo e confiança que tornou a elaboração deste estudo possível, meus sinceros agradecimentos. Aos professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus* Campo Mourão, agradeço pela contribuição para minha formação acadêmica.

Agradeço a todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para que minha caminhada fosse possível. Muito obrigada.

“Que eu jamais me esqueça que Deus me ama infinitamente, que um pequeno grão de alegria é esperança dentro de cada um e capaz de mudar é transformar qualquer coisa, pois a vida é construída nos sonhos e concretizada no amor”.

Chico Xavier

RESUMO

ROSA, Paula Caroline. **Propriedades Termofísicas da Casca do Maracujá**. 2015. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Alimentos), Departamento Acadêmico de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

Cerca de 80% da massa do maracujá é resíduo da produção de sucos. Devido ao seu alto teor de fibras e minerais, a casca, quando não é descartada ou utilizada como fertilizante ou ração animal, pode servir como matéria-prima para a indústria de pectina ou outros ingredientes funcionais. Com base na necessidade do conhecimento das propriedades dos resíduos que podem ser reutilizados, o objetivo do presente trabalho foi estudar as propriedades termofísicas da casca de maracujá e a influência da umidade sobre elas. O calor específico foi determinado pelo método do calorímetro de mistura e encontrou-se um valor médio de aproximadamente $2,75 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. A massa específica foi determinada através da relação entre a massa e o volume ocupado pela amostra e o valor médio foi de 900 kg.m^{-3} . A difusividade térmica foi obtida através da capacidade de difusão do calor através de um cilindro de latão acoplado a um conjunto de termopares. O valor médio da difusividade térmica da casca de maracujá foi de $1,19 \text{ m}^2/\text{s}$ e verificou-se que a propriedade aumentou com o acréscimo da umidade. A condutividade térmica foi determinada a partir dos resultados experimentais obtidos para densidade, difusividade térmica e calor específico e foi encontrado um valor médio de $0,3 \text{ W/m.°C}$.

Palavras-chave: *Passiflora edulis*. Condutividade térmica. Difusividade térmica. Densidade. Calor específico.

ABSTRACT

ROSA, Paula Caroline. **Thermophysical properties of passion fruit peel**. 2015. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Alimentos), Departamento Acadêmico de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

About 80% of the passion fruit mass is considered waste in fruit juice production. Due to its high content of fibers and minerals, the peel, when is not discarded or used as fertilizer or animal feed, can serve as raw material for the pectin industry or other functional ingredients. Based on the need of the knowledge of the wastes properties that may be reused, this work aimed to study the thermophysical properties of passion fruit peel and the influence of humidity on them. The specific heat was determined by mixing calorimeter method and it was found an average value of $2.75 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$. Density was determined through the relationship between mass and volume occupied and the value was approximately of $900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Thermal diffusivity was obtained through the capacity of heat diffusion through a cylinder combined with a thermocouple set. The value of thermal diffusivity of passion fruit peel was $1.19 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ it was verified that the property increased with the increasing of moisture. Thermal conductivity was determined from the experimental results obtained from density, thermal diffusivity and specific heat and was found an average value of $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Keywords: *Passiflora edulis*. Thermal conductivity. Thermal diffusivity. Density. Specific heat.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estrutura do Maracujá (FONTE: Embrapa/CNPMPF, 2014). | 14 |
| Figura 2. Calor específico da casca de maracujá em diferentes umidades. | 23 |
| Figura 3. Comportamento da densidade da casca de maracujá de acordo com os diferentes teores de umidade. | 25 |
| Figura 4. Condutividade térmica da casca do maracujá em diferentes umidades..... | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Comparação entre o calor específico reportado em literatura e no presente trabalho. | 23 |
| Tabela 2. Difusividade térmica da casca de maracujá em diferentes umidades..... | 26 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 | OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 12 |
| 2.2 | <i>Objetivos Específicos</i> | 12 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 3.1 | <i>Maracujá</i> | 13 |
| 3.2 | <i>Casca de Maracujá</i> | 14 |
| 3.3 | <i>Resíduos</i> | 15 |
| 3.4 | <i>Propriedades Termofísicas</i> | 15 |
| 4 | MÉTODOS E PROCEDIMENTOS | 18 |
| 4.1 | <i>Matéria-Prima</i> | 18 |
| 4.2 | <i>Preparo das Amostras</i> | 18 |
| 4.3 | <i>Calor Específico</i> | 18 |
| 4.4 | <i>Densidade Aparente</i> | 20 |
| 4.5 | <i>Difusividade Térmica</i> | 20 |
| 4.6 | <i>Condutividade Térmica</i> | 22 |
| 4.7 | <i>Análise Estatística dos Resultados</i> | 22 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 23 |
| 6 | CONCLUSÕES | 28 |
| 7 | REFERÊNCIAS | 29 |

1. INTRODUÇÃO

O maracujá amarelo (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) é uma fruta de elevada acidez, típica de países tropicais, se adaptando com facilidade ao meio ambiente e muito cultivado no Brasil. A industrialização do maracujá resulta em um rendimento considerável de polpa para fabricação de sucos (CÓRDOVA et al., 2005). A casca do maracujá, resultado do processamento do suco, apresenta potencial para aproveitamento como ingrediente de novos produtos (MONTEIRO et al., 2010), sendo utilizada na forma de farinha e aplicada, associada à farinha de trigo, na elaboração de bolos, por exemplo. Ainda, por ser rica em pectina, pode ser usada em doces em calda, agregando também valor nutricional ao produto (VIEIRA et al., 2010).

A casca do maracujá amarelo também é rica em ferro, cálcio, fósforo e niacina. A niacina atua em seres humanos no desenvolvimento e na produção de hormônios, prevenindo problemas gastrointestinais. Os minerais agem na precaução da anemia, no crescimento e no fortalecimento dos ossos e na formação celular. A pectina, um fragmento de fibra solúvel, é benéfica ao ser humano. A fibra solúvel destaca-se na prevenção de doenças cardiovasculares, gastrointestinais, obesidade, câncer de colón, diabetes, entre outras (CÓRDOVA et al., 2005).

Visando diminuir o problema para destinação indevida dos resíduos, a indústria de alimentos pesquisa formas de aplicação dos seus resíduos, transformando-os em benefícios financeiros e minimizando impactos ambientais (FERREIRA; PENA, 2010). A secagem é um dos métodos alternativos utilizado para o aproveitamento de resíduos, que consiste na eliminação de umidade, retardando o desenvolvimento de microrganismos ou outros tipos de reações indesejáveis e possibilitando a obtenção de um produto diferenciado através desse processo (DEUS, 2011).

Com a finalidade de obter um produto com parâmetros de qualidade desejados por meio da secagem, é necessária a determinação das propriedades termofísicas. Tais propriedades são essenciais para modelagem dos processos envolvendo energia na forma de calor (LESSA, 2011). O conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos é importante para os tratamentos térmicos, tais como secagem, pasteurização, e também para a previsão e controle das várias mudanças que ocorrem nos alimentos durante processos que utilizam variações de

temperatura (MURAMATSU et al., 2009). As propriedades termofísicas são verificadas pela quantidade de energia na forma de calor transferida de um meio para outro em distintas condições de tempo de transferência e temperatura entre eles (MORAN; SHAPIRO, 2009). Os valores medidos e calculados de propriedades termofísicas de alimentos, em vários estudos realizados, já foram publicadas por diversos autores. Vários materiais já tiveram suas propriedades termofísicas estudadas, incluindo um subproduto da indústria frigorífica (OLIVEIRA, 2009), polpa de frutos de maracujá (LESSA, 2011), e soluções modelo similares a sucos (MOURA et al., 2003). Entretanto, ainda existem poucas informações disponíveis propondo a investigação das propriedades térmicas de resíduos do processamento de frutos tropicais.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo Principal*

O presente trabalho tem por objetivo determinar as propriedades termofísicas da casca de maracujá amarelo (*Passiflora edulis f. flavicarpa*).

2.2. *Objetivos Específicos*

Determinar experimentalmente o calor específico, a densidade aparente, a difusividade térmica e a condutividade térmica da casca de maracujá em função da umidade da casca.

Determinar a condutividade térmica da casca do maracujá em função da umidade da casca através da relação entre o calor específico, densidade e difusividade térmica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Maracujá

O maracujá é nativo da América Tropical, com mais de 500 espécies no mundo todo, somente cerca de 20 variedades são comestíveis e as espécies mais cultivadas no mundo são o maracujá-amarelo (*Passiflora edulisf. flavicarpa*), maracujá-doce (*Passiflora alata*) e maracujá roxo (*Passiflora edulis*). Todavia, o maracujá-amarelo é a única espécie cultivada em 95% dos pomares (OLIVEIRA, 2014).

O maracujá (*Passiflora edulis*) é amplamente cultivado no Brasil, podendo ser consumido ao natural ou industrializado. Em nível mundial, a produção de maracujá está em torno de 364 mil de toneladas e o Brasil é o maior produtor mundial de maracujá amarelo (*Passiflora edulisf. flavicarpa*), seguido do Peru, Venezuela, África do Sul, Sri Lanka e Austrália. É rico em vitamina C, cálcio, compostos fenólicos, fósforo, minerais e carotenoides (FERRARI; COLUSSI; AYOUB, 2004).

O β -caroteno presente no maracujá-amarelo (*Passiflora edulis*) é responsável pela cor amarelada característica do suco. O acúmulo desses componentes é alterável e depende, entre muitos fatores, das condições de armazenagem e da maturação. Através das vias metabólicas, tais compostos são produzidos durante o desenvolvimento e maturação de frutos com distintas funções bioquímicas e físicas no órgão, participando em mecanismos de defesa, atratividade e como antioxidantes (ROTILI et al., 2013).

Com relação às características físicas dos frutos de maracujá, o peso médio é de 150 g, do modo que aproximadamente 30% do seu peso é composto pelo albedo, 25% pelo flavedo, 25% pelas sementes e 20% pelo suco. O subproduto de sua industrialização é constituído necessariamente, pela razão que a maior parte da produção de frutos de maracujá é destinada à produção de suco, por cascas e sementes, que comumente são descartadas, representando uma perda de cerca de 80% do peso do fruto (DEUS, 2011).

3.2. Casca de Maracujá

As cascas são divididas em duas frações distintas (Figura 1): o “flavedo” ou epicarpo e o “albedo” ou mesocarpo, facilmente separáveis da polpa que satisfaz à fração comestível do fruto. O albedo, que é a porção esponjosa e branca, é rico em hemicelulose, celulose, lignina, glicídios solúveis, substâncias pécnicas e compostos fenólicos. O flavedo contém substâncias químicas como os carotenoides, vitaminas e óleo essencial (DEUS, 2011).

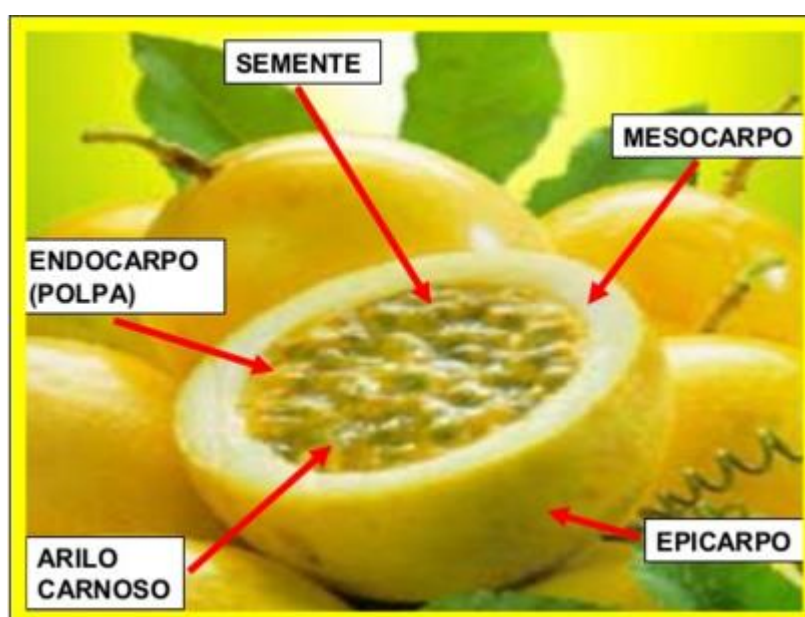


Figura 1. Estrutura do Maracujá (FONTE: Embrapa/CNPMPF, 2014).

A pectina é uma espécie de fibra solúvel que auxilia na redução das taxas de glicose no sangue, fonte de niacina (vitamina B3), ferro, cálcio, e fósforo, que são benefícios ao ser humano (MONTEIRO et al., 2010).

Por apresentar alto conteúdo de fibra alimentar, a casca vem sendo estudada para ser utilizada na alimentação humana. A casca de maracujá amarelo compõe uma matéria prima de baixo custo e viável para a produção de doce em calda, geleias, barras de cereais, cereais matinais e biscoitos (DEUS, 2011).

Pesquisas apontaram que as cascas podem ser utilizadas na forma de farinha, além do emprego da casca de maracujá na elaboração de produtos alimentícios. A farinha de maracujá amarelo contendo de 57,6% de fibras totais

(36,6% de fibras insolúveis e 21,0% de fibras solúveis) controla positivamente a glicemia de pacientes diabéticos tipo 2 (JANEBRO et al., 2008).

3.3. Resíduos

Os resíduos gerados pela indústria alimentícia representam preocupação quanto aos impactos gerados no meio ambiente. As indústrias de suco aproveitam apenas a polpa do maracujá, que corresponde a apenas cerca de 20% de sua massa, sendo o restante descartado ou utilizado como ração animal (MONTEIRO et al., 2010).

A casca, constituída de um tecido esponjoso, é facilmente desidratada. Ela vem sendo pesquisada e se nota viável como fonte alimentar de bom valor nutricional (BERTIPAGLIA et al., 2002).

Tendo em vista a diminuição do problema da destinação imprópria dos resíduos do processamento do maracujá, surge a necessidade do aproveitamento tecnológico das características benéficas, principalmente as relacionadas com o teor e tipo de fibras presentes. Sendo assim, a casca do maracujá pode ser utilizada para o desenvolvimento de novos produtos, como na composição de cereais matinais e no enriquecimento de produtos alimentícios (SPOLADORE, 2014).

3.4. Propriedades Termofísicas

A necessidade de conhecer as propriedades termofísicas dos alimentos é importante para os tratamentos térmicos, tais como secagem, pasteurização, e também para a previsão e controle das várias mudanças que ocorrem nos alimentos durante processos que utilizam variações de temperatura (MURAMATSU et al., 2009).

Para as determinações termofísicas, a principal forma de transferência de energia na forma de calor considerada é a condução, que é caracterizada pela transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas adjacentes que são menos energéticas, devido a interações entre as moléculas (LESSA, 2011).

3.4.1. Calor Específico

O calor específico é a quantidade de energia na forma de calor necessária para alterar a temperatura em 1 grau por unidade de massa, sem mudança de estado (MONTROYA et al.,1990). O valor do calor específico, onde o valor determinado é expresso em $J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$, é principalmente afetado pela quantidade e estado físico da água presente no material, sendo um importante parâmetro termodinâmico para determinação da quantidade de energia que deve ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento de alimentos (LEWIS, 1993). Além disso, é também significativamente influenciado pela composição e estrutura do material (SINGH; HELDMAN, 1993).

Segundo Mohsenin (1980), Hwang e Hayakawa (1979) e Kazarian e Hall (1965), o método mais comum para determinação do calor específico em produtos biológicos é o método das misturas que envolvem um calorímetro. Em geral, o dispositivo baseia-se no equilíbrio térmico estabelecido entre um material que se pretende determinar o calor específico e um segundo material de calor específico conhecido.

3.4.2. Difusividade Térmica

O significado físico da difusividade térmica durante as mudanças da temperatura com o tempo está associado à difusão de calor dentro do produto analisado. Altos valores da difusividade térmica significam uma acelerada transferência do calor dentro do produto e pouco tempo para que o calor saia do corpo, onde o valor determinado é expresso em $(m^2.s^{-1})$ (DINCER, 1995).

A propriedade é também definida como a relação entre a condutividade térmica e o calor específico do produto multiplicado por sua massa específica. Esta relação fornece a informação sobre como a temperatura pode variar quando um material é submetido a um processo de aquecimento ou resfriamento. A difusividade térmica acaba sendo a mais utilizada das propriedades termofísicas para modelagem dos processos térmicos. Isto se deve à descrição da razão entre a capacidade em transferir energia na forma de calor e a capacidade de armazenar energia térmica, em condições onde a transferência de energia na forma de calor ocorre em regime transiente ou estacionário (LEWIS, 1993).

3.4.3. Densidade Aparente

A densidade aparente representa a massa da amostra por unidade de volume aparente, incluindo o volume interno de poros (MOHSEIN, 1980). Desta maneira a massa específica proporciona uma medida do grau de concentração de massa em volume, onde o valor determinado é expresso em quilogramas por metro cúbico ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (MORAN; SHAPIRO, 2002). É um parâmetro essencial no projeto, modelagem e otimização de processos da indústria alimentícia, pois representa efeito direto nas propriedades físicas do alimento.

A densidade aparente é uma propriedade intensiva, que pode alterar de ponto para ponto dentro de um sistema. A importância da sua determinação reside no fato de que o fluxo de energia na forma de calor se difunde por meio do atrito entre as partículas que compõem o fluido ou através da transferência de energia entre os átomos e moléculas (MORAN; SHAPIRO, 2002).

3.4.4. Condutividade Térmica

Segundo Incropera et al. (1996), a condutividade térmica representa a propriedade que relaciona a taxa com que o fluxo de calor escoar através do material, em função da existência de um gradiente de temperatura, onde o valor determinado é expresso em $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$. A condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir energia térmica. A equação proposta por Fourier, no caso de condução unidimensional de calor, é conhecida como a equação fundamental de transferência de calor (WELTY et al., 1984).

A propriedade depende da composição do produto, principalmente da umidade, além da presença de espaços vazios, do grau de homogeneidade estrutural, porosidade, forma, tamanho, arranjo dos poros, orientação das fibras, no caso de carnes congeladas e como de qualquer fator que afeta o fluxo de calor através do material (INCROPERA et al., 1996). Esta propriedade termofísica é importante para avaliação de coeficientes convectivos internos aos equipamentos e para posteriores cálculos dos coeficientes globais de troca térmica, os quais são demandados em qualquer operação de transferência de calor, seja para fins de dimensionamento ou simulação de modelos matemáticos (KERN, 1980).

4. MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

4.1. *Matéria-Prima*

Foram utilizadas cascas de frutos adquiridos no comércio local da cidade de Campo Mourão (PR), maduros e sem danos aparentes. O maracujá foi lavado em água corrente e cortado longitudinalmente para remoção da polpa.

4.2. *Preparo Das Amostras*

As cascas foram lavadas em água corrente, drenadas em peneiras e homogeneizadas. O conteúdo de umidade inicial das cascas (g de água. 100 g⁻¹ de sólido seco) foi determinado conforme método da AOAC (2010).

O material foi seco em uma estufa de secagem (Cienlab) com circulação forçada de ar (2 m.s⁻¹) a 70 °C, conforme metodologia de Spoladore et al. (2014). As cascas, distribuídas sobre bandejas de maneira uniforme, foram posicionadas dentro da estufa lado a lado e de forma que a maior área da bandeja fique exposta ao fluxo de ar. Amostras foram retiradas a cada 30 minutos de secagem, resfriadas a temperatura ambiente e trituradas em processador doméstico (Mini Processador Black & Decker HC32). As cascas, antes e a cada 30 min de retirada da secagem, tiveram as propriedades termofísicas determinadas e comparadas de acordo com seu conteúdo de umidade. A secagem foi finalizada quando não houve variação significativa de massa entre as amostras.

4.3. *Calor Específico*

Para determinar o calor específico da casa de maracujá, foi utilizado o método de mistura calorimétrica, que consistiu no emprego de um recipiente isolado (calorímetro) de capacidade calorífica conhecida contendo água a uma temperatura e massa conhecidas (ZANOELO et al., 2010).

Foi usado um calorímetro construído utilizando-se uma garrafa térmica envolvida por uma camada (4 cm) de isolante térmico (poliestireno expandido) e por uma camada externa composta por um tubo de PVC. Para medição da temperatura interna foi empregado um termômetro digital. Foi necessário determinar a

capacidade calorífica do calorímetro, de acordo com a metodologia sugerida por Mata e Duarte (2003), antes da determinação do calor específico da casca de maracujá. Uma massa conhecida (200 g) de água destilada à temperatura ambiente foi colocada no equipamento. Em seguida, o calorímetro foi fechado com uma rolha de borracha acoplada ao termômetro e foi determinada a temperatura T_1 no interior do calorímetro. Posteriormente, foi colocado no equipamento mais uma quantidade conhecida (200 g) de água aquecida (50 °C) e chamada de temperatura T_2 . A mistura foi agitada e, posteriormente, esperado o tempo até atingir o equilíbrio térmico T_3 . A capacidade calorífica foi calculada com base na Equação 01.

$$C_{cal} = \frac{m_1 c_1 (T_3 - T_2) + m_2 c_1 (T_3 - T_1)}{(T_1 - T_3)} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

$c_1 = c_2 =$ calor específico da água, $4,186 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$;

$m_1 =$ massa de água em temperatura ambiente, 200 g;

$m_2 =$ massa de água quente, 200 g;

$T_1 =$ Temperatura da água ambiente (°C);

$T_2 =$ Temperatura da água quente (°C);

$T_3 =$ Temperatura de equilíbrio da mistura (°C);

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

Após determinada a capacidade calorífica do calorímetro (C_{cal}) e a temperatura de equilíbrio (T_3), foi colocada uma amostra da casca de maracujá a uma temperatura T_4 no calorímetro. A mistura foi agitada até que se atingiu um novo equilíbrio térmico (T_5). O calor específico da amostra foi determinado pelo seguinte balanço de energia (Equação 02) (MATA; DUARTE, 2003; OLIVEIRA, 2009).

$$C_s = \frac{m_s c_1 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_4)}{MBS (T_5 - T_4)} \quad (\text{Equação 02})$$

$$MBS = \frac{m_s 100}{100 - \text{UMIDADE}} \quad (\text{Equação 03})$$

Onde:

c_1 = calor específico da água, $4,186\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$;

m_s = massa de amostra (g);

c_s = calor específico da amostra ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$);

T_4 = temperatura da amostra (°C);

T_5 = temperatura de equilíbrio da mistura (°C);

$m_3 = m_1 + m_2$;

MBS = massa da amostra (g) em base seca.

4.4. Densidade Aparente

A densidade da casca de maracujá foi determinada por meio de adaptação da metodologia utilizada por Caparino et al. (2012). O método adotado consistiu em registrar a massa de uma proveta de 25 mL vazia, em seguida, encheu-se a proveta com a amostra até o volume de 10 mL, de forma compacta. A massa da proveta cheia foi medida e a densidade aparente calculada foi igual a diferença entre a massa total da proveta com a amostra e a massa da proveta vazia dividida pelo volume ocupado pela amostra (Equação 04). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram expressos em quilogramas por metro cúbico ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação (04)}$$

Onde:

V = volume ocupado pela casca (m^3);

m = massa da casca (kg);

ρ = densidade da casca ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

4.5. Difusividade Térmica

O método usado na determinação da difusividade térmica foi baseado no trabalho de Moura et al. (2003), através do uso de um aparato de medição composto por um tubo de latão, com raio de $2,35 \times 10^{-4}$ m e 0,15 m de altura, fechado em uma

das extremidades. Foram instalados dois termopares acoplados, sendo um na superfície, para tomadas de medidas de temperatura nesta posição, outro, tipo agulha, disposto no plano central da amostra. O aparato de medição contendo a amostra compactada foi então totalmente mergulhado em banho térmico de água a 10 °C. Após o equilíbrio térmico entre o tubo e o banho, iniciou-se o aquecimento, que foi interrompido quando a temperatura interna da amostra atingiu aproximadamente 70 °C. As medidas de temperatura foram registradas em intervalos de 1 minuto. Além de possibilitarem a monitoração da taxa de elevação de temperatura do banho térmico, os dados obtidos serviram de base para o tratamento gráfico dos perfis de evolução das temperaturas externa e interna. A difusividade térmica foi calculada pela Equação 05 (MOURA et al., 2003).

$$\alpha = \frac{AR^2}{4(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})} \quad (\text{Equação 05})$$

Onde:

α = difusividade térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

A = taxa de aumento de temperatura do banho ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$);

R = raio do tubo (m);

$(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$ = diferença entre a temperatura externa e a temperatura interna do tubo ($^{\circ}\text{C}$).

O valor de A utilizado no cálculo é o valor obtido a partir da fase constante de aumento da temperatura do banho. O valor da diferença de temperatura externa e interna diminui à medida que a temperatura do banho aumenta, devido ao aumento da convecção. Como foram realizadas medidas a cada 1 minuto, o valor calculado para a difusividade foi obtido a partir da média dos valores na faixa estudada.

4.6. Condutividade Térmica

A condutividade térmica do produto foi determinada indiretamente através da Equação 06, utilizando-se os valores experimentais da densidade aparente, do calor específico e da difusividade térmica (MOURA et al., 2003).

$$k = \alpha \times \rho \times C_p \quad (\text{Equação 06})$$

Onde:

α = difusidade térmica ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

k = condutividade térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$);

ρ = densidade aparente ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

C_p = calor específico da amostra ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)

4.7. Análise estatística dos resultados

Os resultados médios das determinações experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com nível de 5% de significância, e as médias comparadas pelo Teste de Tukey, através da ferramenta computacional Statistica 7.1.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Calor Específico

Para a medição do calor específico da casca de maracujá, foi realizada uma validação da técnica utilizada. Foram escolhidos três alimentos (arroz, banana e farinha de trigo) com valores de calor específico disponíveis em literatura (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação entre o calor específico reportado em literatura e no presente trabalho.

| | Calor específico (J.g ⁻¹ .°C ⁻¹) | | |
|--------------------------------------|---|------------------|----------------|
| | Arroz | Farinha de Trigo | Banana |
| Experimental (média e desvio padrão) | 1, 216 ± 0, 004 | 1, 528 ± 0,186 | 3, 328 ± 0,861 |
| Stanley e Charm (1971) | 1,757 | - | 3,040 |
| Oliveira e Zanoelo (2011) | 1,745 | - | 3,347 |
| Mohsenin (1980) | - | 1,371 | - |

A comparação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores reportados em literatura confirmam a validade do procedimento adotado para determinação do calor específico da casca de maracujá.

Os resultados dos ensaios realizados para determinação do calor específico da casca de maracujá em função da umidade estão apresentados na Figura 2.

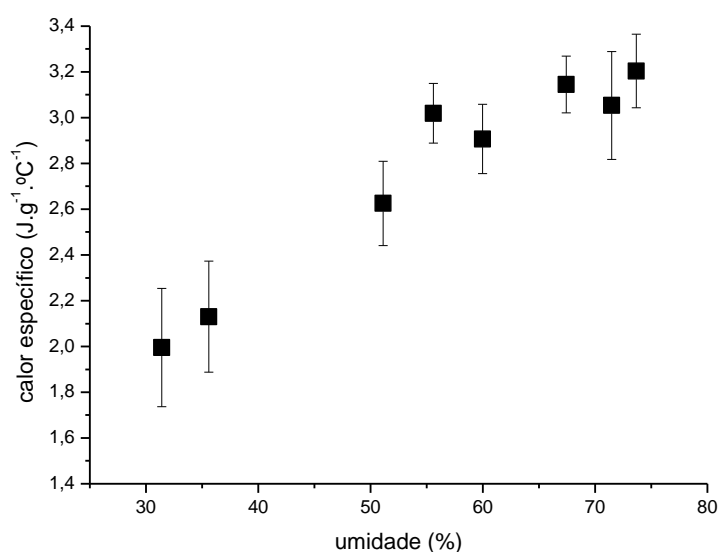


Figura 2. Calor específico da casca de maracujá em diferentes umidades.

Verificou-se, através do Teste de Tukey (5% de significância), que as cascas de maracujá correspondentes às umidades de 73,7%, 71,5%, 67,4% e 55,6% apresentaram valores de calor específico semelhantes estatisticamente entre si.

Lessa (2011) determinou valores de calor específico de polpas das espécies *P. edulis*, *P. flavicarpa*, *P. cincinnata* e *P. setacea*, em triplicata, utilizando-se um calorímetro de mistura. Os resultados obtidos foram respectivamente, 3,21 kJ.kg⁻¹.K⁻¹, 3,66 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ e 3,09 kJ.kg⁻¹.K⁻¹. Já Muniz et al. (2006), avaliando o calor específico de polpa de bacuri em diferentes concentrações (5 a 20 °Brix), encontraram valores através de um calorímetro de mistura, resultados que variaram de 3,61kJ.kg⁻¹.°C⁻¹ a 2,98 kJ.kg⁻¹.°C⁻¹. Ambos os autores afirmam que, à medida que a umidade do produto aumenta, o valor do calor específico aproxima-se do da água pura (4,186kJ.kg⁻¹.°C⁻¹) à temperatura ambiente.

O calor específico é afetado de forma significativa pela quantidade de água presente na fruta, bem como pelo estado físico em que a água se encontra (LESSA, 2011).

5.2. Densidade

Na Figura 3 observa-se o comportamento da densidade da casca de maracujá de acordo com os diferentes teores de umidade estudados. Verifica-se um valor médio de cerca de 900 kg.m⁻³ para teores de umidade superiores a 50% e um decréscimo da densidade para 468,78 kg.m⁻³ quando a casca apresenta 31% de umidade. O valor inferior de densidade foi caracterizado por apresentar-se estatisticamente diferente dos demais através do Teste de Tukey (5% de significância).

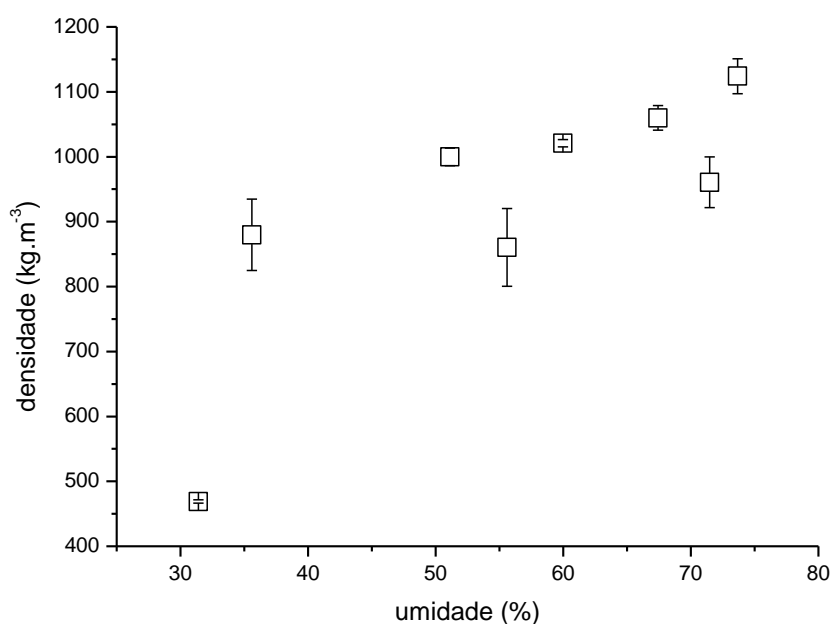


Figura 3. Comportamento da densidade da casca de maracujá de acordo com os diferentes teores de umidade.

De acordo com Bon et al. (2009) a densidade da polpa de manga mostrou um comportamento distinto, com um decréscimo de $1192,2 \text{ kg.m}^{-3}$ até $991,2 \text{ kg.m}^{-3}$ com o aumento da umidade. Oliveira e Zanoelo (2011), ao avaliarem a influência da umidade sobre a densidade de um subproduto da indústria frigorífica, verificaram que os valores da propriedade aumentaram com o acréscimo da fração mássica de água do material.

5.3. Difusividade Térmica

Observam-se na Tabela 2 os valores de difusividade térmica para as cascas de maracujá de acordo com diferentes teores de umidade. Verifica-se que a difusividade térmica apresentou um acréscimo em relação ao aumento da umidade. Somente os valores de difusividade média correspondentes às umidades de 51,1 e 71,5% apresentaram semelhança estatisticamente significativa ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey.

Tabela 1. Difusividade térmica da casca de maracujá em diferentes umidades

| Umidade (%) | Difusividade térmica (m ² .s ⁻¹) | Desvio padrão |
|-------------|---|-----------------------|
| 31,4 | 1,01x10 ^{-7f} | 0,12x10 ⁻⁷ |
| 35,6 | 1,12x10 ^{-7e} | 0,14x10 ⁻⁷ |
| 51,1 | 1,20x10 ^{-7c} | 0,27x10 ⁻⁷ |
| 55,6 | 1,29x10 ^{-7b} | 0,12x10 ⁻⁷ |
| 60,0 | 1,15x10 ^{-7d} | 0,11x10 ⁻⁷ |
| 71,5 | 1,22x10 ^{-7c} | 0,13x10 ⁻⁷ |
| 73,7 | 1,32x10 ^{-7a} | 0,11x10 ⁻⁷ |

NOTA: letras diferentes sobrescritas às médias expressam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey.

Em alimentos com elevado conteúdo de água (>70%), o valor da difusividade térmica de $1,4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ é considerado admissível (SARRIA et al., 2004).

Sarria et al. (2004) determinaram valores de difusividade térmica de fruto de figo para cada diferença de temperatura e para cada tempo gasto durante o aquecimento da amostra. Os resultados obtidos entre 1,6 °C a 2,4 °C foram de $0,80 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2,39 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e o valor da difusividade média foi de $1,56 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Muniz et al. (2006) avaliaram que a difusividade térmica para as polpas de bacuri decresceu com o aumento da concentração. Os decréscimos foram de $1,787 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $1,637 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ em relação ao aumento da concentração de 5 a 20 °Brix, respectivamente. Esta conduta significou, conforme os autores, que fisicamente o acréscimo da concentração diminui a velocidade com que o calor se propaga ou se difunde através da polpa.

5.4. Condutividade Térmica

Na Figura 4, pode ser observado o comportamento crescente da condutividade térmica da casca de maracujá em com o aumento da umidade.

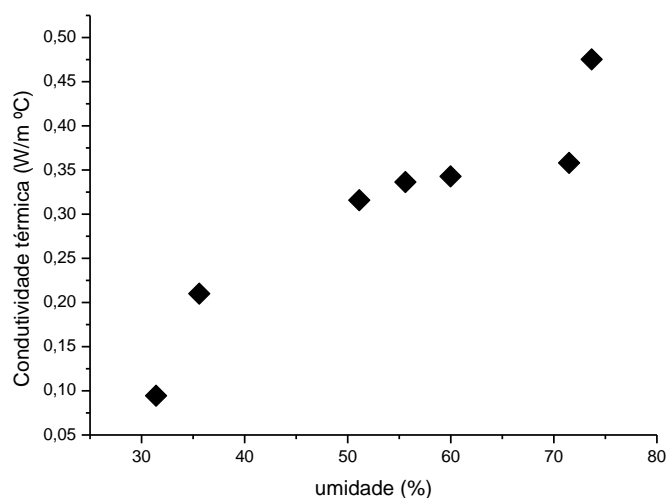


Figura 4. Condutividade térmica da casca do maracujá em diferentes umidades.

Segundo Oliveira (2009), assim como o calor específico, a condutividade térmica de alimentos é conhecida por aumentar com o aumento da umidade. A água apresenta condutividade térmica mais elevada que os outros componentes do alimento, o que ocasiona um aumento da condutividade com o acréscimo da umidade do produto.

Bon et al. (2009) observaram que a condutividade térmica da polpa de manga aumentou de 0,377 W/m°C a 0,622 W/m°C com o aumento da umidade e da temperatura. Foram observados resultados por Sarria et al. (2004) de condutividade térmica de fruto de figo para cada diferença de temperatura da amostra. Os valores obtidos entre 5°C a 21 °C foram de 0,49 W/m°C a 0,55 W/m°C, e o valor médio foi aproximadamente de 0,52 W/m°C. Sweat (1974) reporta para pêssego uma condutividade térmica de 0,581 W/m°C e para pêra, de 0,595 W/m°C.

Portanto, pode-se observar que os valores encontrados no presente trabalho são próximos dos valores reportados para frutos carnosos.

6. CONCLUSÃO

Através das metodologias utilizadas, foi possível determinar as propriedades termofísicas da casca de maracujá.

As determinações experimentais do calor específico pelo método da mistura calorimétrica permitiram encontrar um valor médio de cerca de $2,75 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. A casca de maracujá apresentou valores que apresentaram tendência a aproximar-se do calor específico da água com o aumento da umidade.

A densidade aparente média das cascas de maracujá foi de aproximadamente 900 kg.m^{-3} , com exceção da amostra mais seca (31,4%) entre as analisadas.

A difusividade térmica da casca de maracujá foi maior para maiores teores de umidade e apresentou um valor médio de $1,19 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

A partir dos valores experimentais do calor específico, da densidade aparente e da difusividade térmica, foi possível calcular a condutividade térmica da casca de maracujá em função da umidade da casca. Verificou-se que a condutividade térmica das amostras foi menor nas cascas de menor umidade.

A proposta permitiu a construção de um calorímetro e de um sistema para calcular a difusividade térmica com baixo custo, de montagem simples e com materiais facilmente encontrados. Tais dispositivos podem servir como suporte didático e de pesquisa, substituindo materiais de custo elevado ou com necessidades de manutenção. Apesar de não existirem dados de literatura para as propriedades termofísicas da casca de maracujá, através dos dados obtidos, verificaram-se resultados similares aos encontrados em literatura para diversos produtos alimentícios.

7. REFERÊNCIAS

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Norma nº 985.19**. Washington, 1970. Disponível em: <http://www.aoac.org/oma_revision/toc.htm> Acesso em 30 de maio de 2015.

ARAUJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades Termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. *Ciências Agrotecnologia*, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, jan./fev., 2004.

BERTIPAGLIA, L. M. A.; ALCADE, C. R.; SIQUEIRA, G. B.; MELO, G. M. P.; ANDRADE, P. Degradação *in situs* da matéria seca, proteína bruta e fibra em detergente neutro de silagens de milho e resíduo da extração do suco de maracujá. **Acta Scientiarum, Maringá**, v. 22, n. 3, p. 765-769, 2002. B

BON, J.; VÁQUIRO, H.; BENEDITO, J.; TELIS-ROMERO, J. Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins). **Journal of Food Engineering**, n. 6, p. 563-568, dec. 2009.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, n. 14, p. 135-148, feb. 2012.

CÓRDOVA, K. R. V.; GAMA, T. M. M. T. B.; WINTER, C. M. G.; NETO, G. K.; FREITAS, R. J. S. Características Físico-Químicas da Casca do Maracujá Amarelo (*Passiflora edulis Flavicarpa Degener*) Obtida Por Secagem. **B.CEPPA**, Curitiba, v. 23, n. 2, p. 211-230, jan. 2005.

DEUS, G. I. **Efeitos da Temperatura de Secagem nos Teores de Cianogênicos Totais e Fibra Alimentar de Casca de Maracujá**. 2011. 44 f. Pós-Graduação - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

DINCER, I. Thermal diffusivities of geometrical objects subject to cooling. **Applied Energy**, London, v.51, p.111-8, 1995.

FERRARI, R. A.; COLUSSI, F.; AYUB, R. A. Caracterização de subprodutos da industrialização do maracujá- aproveitamento das sementes. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 101-102, Abril 2004.

FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p.15-28, fev. 2010.

HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. A specific heat calorimeter of foods. **Journal of Food Science**, v. 44, p. 435-438, 1979.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 886p.

KALETUNÇ, G. Prediction of specific heat of cereal flours: A quantitative empirical correlation. **Journal of Food Engineering**. v. 82, n. 4, 2007, p. 589-594.

KAZARIAN, E. A.; HALL, C. W. **Thermal properties of grain**. Transactions of the ASAE, v. 8, n. 1, 1965.

KERN, D. Q. **Processos de transmissão de calor**. Guanabara, Dois S. A. Rio de Janeiro, 1980.

JANEIRO, D. I.; QUEIROZ, M. S. R.; RAMOS, A. T. SABAA-SRUR A. U. O.; CUNHA, M. A. L.; DINIZ, M. F. M. Efeito da farinha da casca do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.) nos níveis glicêmicos e lipídicos de pacientes diabéticos tipo 2. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, João Pessoa, v. 18, suplemento, p. 724-732, 2008.

LESSA, A. O. Determinação do Teor de Compostos Fitoquímicos e Estudo do Potencial para Processamento da Polpa de Frutos de Maracujá das Espécies Silvestres (*Passiflora setacea* DC, *Passiflora cincinnata* MAST). 2011. 83 f. **Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos**, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga - Bahia, 2011.

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

MATA, M. E.; DUARTE, M. E. M. Calor específico da polpa de cajá a temperaturas criogênicas e diferentes concentrações de sólidos solúveis: métodos das misturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, n.1, p. 1-7, 2003.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of food and agricultural materials**. New York, Science Publishers, 1980. 742 p.

MONTEIRO, L. B.; MENDONÇA, M. R.; ANDRADE, A. T.; CAMARGO, T.; SOUSA, K. M.; OI, R.; MORAES, M. S.; LIA, L. R. B.; JUNIOR, D. M. Curva de Secagem do Mesocarpo do Maracujá. **Ceciliana**, Santos, v. 3, n. 2, p. 42-44, jun. 2010.

MONTOYA, E. C.; OLIVEIROS, T. C. E.; ROA, M. G. Optimización operacional del secador intermitente de flujos concurrentes para café pergamino. **Cenicafé**, n. 41, v.1, p.13-19, 1990.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, editora LTC – Livros Técnicos e Científicos, 4ª edição, Rio de Janeiro, 2002.

MOURA, S. C. 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, n. 23, v.1, p.62-68, jan.–abr. 2003.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ, J. M.; F, R. M.F.; DUARTE, M. E. M. Caracterização Termofísica de Polpas de Bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, n. 9, v. 2, p.360-368, abr.-jun. 2006.

MURAMATSU, Y.; SAKAGUCHI, E.; ORIKASA, T.; TAGAWA, A. Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method. **Journal of Food Engineering**, v. 5, n. 8, p. 607-613, set. 2009.

OLIVEIRA, F. S. Equilíbrio Higroscópico de Microcápsulas do Extrato Antioxidante da Semente do Maracujá. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Alimentos)**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

OLIVEIRA, G. A. Propriedades termofísicas de mistura proteica resultante da hidrólise de subprodutos da indústria frigorífica. **Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos)** – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ROTILI, M. C. C.; COUTRO, S.; CELANT, V. M.; VORPAGEL, J. A.; BARP, F. K.; SALIBE, A. B.; BRAGA, G. C. Composição, atividade antioxidante e qualidade do maracujá-amarelo durante armazenamento. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 227-240, jan./fev. 2013.

SARRIA, S. D.; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica L.*) "Roxo de Valinhos". **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.185-194, jan./abr. 2004

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. 2nd Ed. New York. Academic press. 1993.

SPOLADORE, S. F.; BISSARO, C. A.; VIEIRA, T. F.; SILVA, M. V.; HAMINIUK, C. W. I.; DEMCZUK JR., B. Modelagem matemática da secagem de casca de maracujá e influência da temperatura na cor, compostos fenólicos e atividade antioxidante.

Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos, Campo Mourão, v. 5, n. 2, p. 17-25, 2014.

STANLEY, E.; CHARM, S. D. **The fundamentals of food engineering**. 2nd ed. The Avi Publishing Company, Inc., 1971, p. 601.

SWEAT, V.E. Experimental values of thermal conductivities of selected fruits and vegetables. **Journal of Food Science**, Chicago, n. 39, p. 1081-3, 1974.

VIEIRA, C. F. S.; MARTINS, G. A. S.; BORGES, S. V.; CARNEIRO, J. D. S.; REGES, I. S. Utilização de Farinha de Casca de Maracujá Amarelo em Bolo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 6, n. 11, p.1-10, 2010.

ZANOELO, E. F.; BENINCÁ, C.; RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. **Journal of Food Process Engineering**, 2010.

WELTY, J. R.; WICKS, J. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat and mass Transfer**, 3rd ed., John Wiley and Sons, 1984.