

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**  
**Coordenação de Engenharia Química/CCET**  
Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



**ANA CRISTINA GOMES RODRIGUES**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DIFUSIVO E  
PROPRIEDADES QUÍMICAS DA CASTANHA DO  
MARANHÃO**

São Luís  
2018

**ANA CRISTINA GOMES RODRIGUES**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DIFUSIVO E  
PROPRIEDADES QUÍMICAS DA CASTANHA DO  
MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís  
2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Gomes Rodrigues, Ana Cristina.

Determinação do coeficiente difusivo e propriedades químicas da Castanha do Maranhão / Ana Cristina Gomes Rodrigues. - 2018.

55 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Castanha do Maranhão. 2. Cinética de secagem. 3. Geometria de esfera. I. Villa Vélez, Harvey Alexander. II. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ  
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO  
COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DA SILVA COELHO  
COEQ/CCET/UFMA

**10 de dezembro de 2018**

**DADOS CURRICULARES****Ana Cristina Gomes Rodrigues**

<b>NASCIMENTO</b>	26/01/1993– BACABAL/MA
<b>FILIAÇÃO</b>	Francisco de Assis Rodrigues Raimunda dos Santos Gomes Rodrigues
<b>2012/2018</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, Assis e Raimunda, ao meu irmão Thiago e ao meu padrinho Pedro que sempre acreditaram em mim e me incentivaram nos estudos.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, que foi e é minha força nos momentos de dificuldades ao longo da minha graduação.

À minha família, em especial meu pai, minha mãe e meu irmão que são a razão de eu estar aqui e pela qual quero chegar ainda mais longe, se não fosse por vocês eu não teria conseguido dar nem o primeiro passo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Harvey, que, ao longo da minha graduação, sempre se disponibilizou para me ajudar, sendo, muitas vezes, o conselheiro que me impulsionava nos momentos de desânimo. E nessa reta final sou grata pelo incentivo, orientação, paciência, auxílio e o máximo suporte para que esse trabalho pudesse ser concluído com êxito.

Aos professores Audirene, Jaciene e Wendell, que são para mim exemplos de profissionais preocupados com o que acontece na vida dos alunos além da sala de aula, fazendo sempre o possível para ajudá-los e impulsioná-los a seguir adiante.

Às minhas amigas Girleia e Larissa, que estiveram presentes na maioria dos momentos alegres e tristes, sendo fonte contínua de apoio, incentivo e tornando, por vezes, suportável o cansaço e a exaustão física e mental.

À Érica, que exerceu, por meio do seu empenho e dedicação, um papel fundamental para que esse trabalho pudesse ser realizado, auxiliando-me com as análises e tornando as longas horas de sábado mais agradáveis com nossas conversas e risadas no laboratório.

Ao meu namorado, Pedro, por todo apoio e incentivo, especialmente, nos meus momentos de cansaço.

Ao Ministério Universidade Renovadas e aos amigos conquistados nele, que desde o meu primeiro semestre foram e são fonte de inspiração e renovação.

Aos meus companheiros de apartamento, Mateus, Gaby, em especial, à Camila, por me aguentarem falando diariamente a respeito deste trabalho e seguirem sempre, com paciência, me ouvindo e apoiando.

Por fim, queria agradecer a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da realização desse projeto.

Gratidão!

“Deus nunca inspira os sonhos em nosso coração se  
Ele não quiser realizá-los...”

*Santa Teresinha do Menino Jesus*



RODRIGUES, A.C.G. **Determinação do coeficiente difusivo e propriedades químicas da castanha do maranhão.** 2018. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

## RESUMO

*Pachira aquática Aubl* (família Bombacaceae), também conhecida como mungubá, castanheira-do-Maranhão, castanheira e cacau-selvagem, é uma árvore nativa do sul do México até o norte da América do Sul. Seus frutos, comestíveis, assemelham-se ao cacau e tem sabor similar ao amendoim. Apesar da semente da Castanha do Maranhão ser usada como alimento, ter ação antimicrobiana e inseticida, o estudo sobre sua constituição química ainda é escasso. Dessa forma surge a necessidade de entender melhor suas características e valor nutricional, usando o processo de secagem como forma de compreensão para o seu processamento. Assim, o presente trabalho tem como objetivo determinar o coeficiente difusivo efetivo da água e propriedades físico-químicas da semente da Castanha do Maranhão. Para isto, foi determinado o conteúdo de umidade, lipídeos, proteínas, cinzas e carboidratos do material in natura, além de propriedades físicas de forma e densidade aparente. Para a secagem, foi usado um secador convectivo onde as amostras foram submetidas às temperaturas de secagem de 30, 45 e 60 °C em um determinado tempo. A modelagem das cinéticas de secagem foi realizada empregando a solução numérica da segunda Lei de Fick para uma geometria esférica. Os resultados químicos mostraram um produto com alto conteúdo de umidade e cinzas e de forma semelhante ao esferoide-esfera. Já na secagem, observou-se que na temperatura de 60 °C o *MRE* foi de 10,148 %, bem no limite de consideração como “eficiente”. Em relação à temperatura, a de 60 °C apresentou o melhor desempenho. Observou-se ainda que os coeficientes difusivos são diretamente proporcionais à temperatura e que a energia de ativação foi de 0,608 kJ/mol para o sistema.

**Palavras-chave:** Castanha do Maranhão. Cinética de secagem. Modelagem matemática. Geometria de esfera.

RODRIGUES, A.C.G. **Determination of diffusive coefficient and chemical properties of Maranhão chestnut.** 2018. 55 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

### **ABSTRACT**

*Pachira aquatica* Aubl (Bombacaceae family), also known as munguba, Maranhão Nut and wild cocoa, is a native tree from southern Mexico to the north of South America. Its edible fruits resemble the cocoa and has a similar flavor to peanuts. Although Maranhão Chestnut is used as food, have antimicrobial action and insecticide, the study of its chemical constitution is still scarce. In this way, the need to better understand its characteristics and nutritional value arises, using the drying process as a way of understanding its processing. Thus, the present work has as objective to determine the effective diffusive coefficient of water and physical-chemical properties of the seed of Maranhão Chestnut. For this, the content of moisture, lipids, proteins, ashes and carbohydrates of the in natura material, as well as physical properties of shape and apparent density were determined. For drying, a convective drier was used where the samples were submitted to drying temperatures of 30, 45 and 60 °C at a given time. The modeling of drying kinetics was performed using the numerical solution of the second Fick Law for a spherical geometry. The chemical results showed a product with a high content of moisture and ash and in a similar way to the sphere spheroid. On drying, it was observed that at the temperature of 60 °C the SRM was 10,148%, well in the limit of consideration as "efficient". Regarding the temperature, the 60 °C showed the best performance. It was also observed that the diffusive coefficients are directly proportional to the temperature and that the activation energy was 0,608 kJ / mol for the system.

**Keywords:** Maranhão Chestnut. Drying kinetics. Mathematical modeling. Sphere geometry.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Exemplo de curva de secagem .....	07
Figura 2 – Umidade versus atividade de água .....	10
Figura 3 – Amostras de Castanha do Maranhão .....	17
Figura 4 – Desidratador de bandejas com circulação de ar forçado .....	18
Figura 5 – Termo-higrômetro .....	18
Figura 6 – Desenho esquemático dos grãos de amendoim considerados esferoides triaxiais, com suas dimensões características .....	20
Figura 7 – Taxa de secagem das curvas de secagem da Castanha do Maranhão nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C .....	25
Figura 8 – Curvas de secagem da Castanha do Maranhão nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C e simuladas pelo modelo Difusivo para geometria esférica .....	27
Figura 9 – Relação tipo Arrhenius entre o coeficiente difusivo da água para a Castanha do Maranhão e a temperatura .....	28

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Métodos de análise para determinação da composição química de materiais orgânicos.....	16
Tabela 2 – Composição química da Castanha do Maranhão.....	23
Tabela 3 – Resultados experimentais do conteúdo de umidade às diferentes temperaturas de secagem .....	24
Tabela 4 – Resultados da modelagem e simulação das curvas de secagem empregando o modelo Difusivo para geometria esférica.....	26
Tabela 5 – Medidas de propriedade de forma e tamanho da semente da Castanha do Maranhão .....	29

## SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	viii
DADOS CURRICULARES .....	iv
DEDICATÓRIA.....	viii
AGRADECIMENTOS .....	viii
EPÍGRAFE.....	viii
RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo geral .....	3
2.1 Objetivos específicos.....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1 Castanha do Maranhão .....	4
3.1.1 Origem e aspectos gerais .....	4
3.1.2 Características taxonômicas .....	4
3.1.3 Características químicas .....	5
3.2 Secagem.....	6

3.2.1 Fundamentos.....	6
3.2.2 Secagem convectiva .....	7
3.2.3 Secagem de grãos e amêndoas.....	9
3.2.4 Atividade de água .....	9
3.2.5 Transferência de massa e calor .....	10
3.3 Modelagem no processo de secagem .....	11
3.3.1 Modelos difusivos .....	11
3.3.2 Modelos empíricos de camada fina .....	13
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
4.1 Matéria prima e preparação das amostras.....	16
4.2 Análises físico-químicas da castanha do maranhão .....	16
4.3 Determinação das cinéticas de secagem .....	16
4.4 Modelagem e simulação do processo de secagem.....	18
4.5 Medidas de propriedades de forma.....	19
4.7 Estimativa dos parâmetros e análise estatística .....	20
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>21</b>
5.1 Caracterização química.....	22
5.2 Cinética de secagem .....	23
5.3 Modelagem matemática das curvas de secagem .....	25
5.4 Difusividade efetiva da secagem da Castanha do Maranhão .....	27
5.5 Medidas de propriedades de forma da Castanha do Maranhão .....	28
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

*Pachira aquática Aubl* (família Bombacaceae), vulgarmente conhecida como mungubá, castanheira-do-Maranhão, castanheira e cacau-selvagem, é uma árvore nativa do sul do México até o norte da América do Sul, na área compreendida pela floresta amazônica, onde pode ser encontrada frequentemente em terrenos alagadiços e matas ciliares, entretanto, apresenta a característica de facilmente adaptar-se às condições edáficas e climáticas diversas (PEIXOTO et al., 2002).

Seus frutos são comestíveis, assemelhando-se, aparentemente ao cacau e, quanto ao sabor, ao amendoim, podem ser consumidos crus ou cozidos, ou como farinha para fazer pão. Pode-se comer também as flores e folhas. Segundo Carvalho (2014) possui muitas sementes, envolvidas por espécie de lã esbranquiçada. Há alguns usos medicinais dessa espécie como: a pele do fruto verde é utilizada no tratamento de hepatite, as sementes são usadas como anestesia, a casca, para tratar dores de estômago e cabeça e a infusão em água fria pode ser tratamento para uma sensação de queimação na pele.

Na literatura, o estudo sobre as constituições químicas da castanha do Maranhão é escasso. Na Nigéria, *Pachira glabra* é cultivada em pátio e jardins, como uma planta ornamental devido às suas atraentes flores. E lá, pela primeira vez, de acordo Oladipupo, et al., (2014) conseguiu-se relatar a composição química, ação antimicrobiana e inseticida de óleos essenciais dessa planta.

Além das propriedades químicas e nutricionais, pouco é conhecido e documentado sobre suas propriedades físicas e características de processo da *Pachira aquatica Aubl*. Entre as características de processo, a taxa de desidratação é um dos parâmetros principais a serem estudados, pois permitem determinar a velocidade com que a água dentro do material interaciona com o meio circundante (LIMA et al., 2017).

A secagem é um dos processos mais antigos utilizados pelo homem na conservação de alimentos. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido. A secagem de material vegetal tem como objetivo cessar as alterações químicas nos tecidos e evitar possíveis degradações durante o seu armazenamento, mantendo, assim, suas características físicas e químicas por mais tempo (CORRÊA et al., 2004).

Os modelos empíricos de secagem apresentam relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem. Eles negligenciam os fundamentos do processo de secagem, e seus parâmetros não têm qualquer significado físico. Desta forma, os modelos empíricos não fornecem uma perspectiva dos importantes processos que ocorrem durante a secagem, embora, em alguns casos, possam descrever as curvas de secagem, para determinadas condições experimentais (KEEY 1972).

Dentre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais intensamente investigado. Este modelo considera, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que descreve que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2002).



## **2 OBJETIVOS**

O presente trabalho auxiliará em um melhor entendimento a respeito da castanha do Maranhão, suas características e propriedades, bem como seu processo de secagem e processamento. Essa planta pode ter um papel fundamental no desenvolvimento do Maranhão, uma vez que ao se industrializar o processo é possível obter produtos com alto valor nutricional.

### **2.1 Objetivo geral**

Determinar o coeficiente difusivo efetivo da água e propriedades físico-químicas da semente da castanha do maranhão em função da temperatura

### **2.1 Objetivos específicos**

- Fazer uma análise físico-química e de características de forma da semente da Castanha do Maranhão.
- Construir as cinéticas de secagem experimentais para a semente da castanha do Maranhão em três níveis de temperatura 30, 45 e 60 °C.
- Determinar o período de taxa de secagem das cinéticas de secagem.
- Determinar o coeficiente difusivo da água para a castanha do Maranhão em função da temperatura.
- Determinar a energia de ativação do processo de secagem da semente da castanha do Maranhão.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Castanha do Maranhão

##### 3.1.1 ORIGEM E ASPECTOS GERAIS

*Pachira aquatica* Aubl. é nativa da parte sul do México até o norte da América do Sul. Na região amazônica, ocorre predominantemente em terrenos sujeitos a inundações periódicas, especialmente às margens de rios e córregos. É uma espécie muito cultivada como ornamental, especialmente para a arborização de praças e jardins. É uma árvore de tronco grosso, castanho-amarronzado a marrom, às vezes com base alargada; a copa é grande e muito densa, sempre verde; as folhas são alternas, digitadas, verde-escuras. As flores chamam a atenção pelo tamanho, coloração e perfume, dispendo-se preferentemente na parte terminal dos ramos; os botões fechados são espatáceos e podem alcançar 28 cm de comprimento; as flores em antese podem alcançar 23 cm de diâmetro; as pétalas, estreitas e compridas (cerca de 1,3 x 25cm), são de coloração castanho-amareladas e os longos e muitos estames são brancos na parte basal e róseo-avermelhados em direção ao ápice, com anteras avermelhadas a vináceas. A abertura das flores ocorre predominantemente ao final do dia, quando um suave perfume é liberado, atraindo mariposas e morcegos; nas primeiras horas da manhã, muitas abelhas acorrem às flores. (PEIXOTO LUNA et al., 2002).

A mongubeira (*Pachira aquatica* Aubl.) é uma frutífera utilizada na arborização urbana de várias cidades do interior do país e, pouco frequente em seu habitat natural, que são as matas periodicamente inundáveis do litoral do Pará e Maranhão. É uma árvore perenifólia de copa densa, medindo de 6-14 m de altura. Suas castanhas podem ser consumidas *in natura*, porém geralmente são torradas (LORENZI et al., 2006).

##### 3.1.2 CARACTERÍSTICAS TAXONÔMICAS

O fruto é do tipo cápsula septicida, deiscente, semi-lenhoso, polispérmico e de coloração castanho-escuro, epicarpo glabro e sem brilho; mesocarpo de consistência fibrosa, cujo formato é geralmente ovalado, alguns são arqueados e com fendas longitudinais no pericarpo, sendo constituído por cinco septos com deiscência longitudinal. No fruto há restos de pedúnculo persistentes e o endocarpo, que cobre as sementes como um todo, tem

consistência esponjosa, coloração esbranquiçada e encontra-se geralmente localizado na parte central de cada septo, cuja base é constituída por pêlos curtos e translúcidos. Os frutos têm, em média, 123,15 mm de comprimento, 81,94 mm de diâmetro e peso de 317 g. O número médio de sementes encontradas por fruto foi de 8,58, com número máximo 18 e mínimo 2. As sementes variam de reniformes a angulosas, possui embrião do tipo invaginado, sulcado, dobrado, crasso envolvendo totalmente o eixo hipocotilar, com endosperma hialino e gelatinoso. A germinação é do tipo epígea fanerocotiledonar com início ocorrendo aproximadamente no oitavo dia e termino no 15<sup>o</sup> dia após a semeadura (SILVA et al., 2012).

### 3.1.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

As informações, na literatura, sobre as características químicas de várias espécies de *Pachira* são escassas. O estudo químico das cascas, do caule e raízes da *B. glabra* levaram à isolamento e identificação de 5-hidroxi-3,7,4'-trimetoxiflavona, 5-hidroxi-3,6,7,4'-tetrametoxiflavona, a naftoquinona isohemigossipolona, o éster triacontil *p*-cumarato, lupeol e uma mistura de  $\beta$ -sitosterol e estigmasterol; bem como 5-hidroxi-3,6,7,8,4'-pentametoxiflavona, lupenona, 9,19-ciclolanost-23-eno-3beta, 25-diol, (24R) -9,19-ciclolanost-25-eno-3beta, 24-diol e (24S) -9,19-ciclolanost-25-eno-3beta, 24-diol. Da composição do *B. glabra* do Brasil, os mais significativos foram ácido palmítico (56,06%) e ácido estéreoico (24,83 %) (LAWAL et al., 2014)

Entretanto, *P. aquática* parece ser a mais estudado das espécies de *Pachira*. Ácidos graxos como ácido malvático, ácido  $\alpha$ -hidroxi-esterulico e ácido palmítico foram previamente descritos a partir da planta (SPITZER, 1991). A análise fito química de *P. aquatic* descreveu o isolamento de uma fungitoxina antifúngica conhecida como isohemigossipolona (SHIBATANI et al., 1999); aquatidial, bis-norsesquiterpenoide, *p*-cumarato de triacontilo e lupeol 8 ; 11-hidroxi-2- *O*- metil-inibiscolactona A e *O*- metilbaixiscona D, juntamente com 18 compostos conhecidos, incluindo 5-hidroxianuranetina, kaempferol-3,7,4'-trimetil éter, santi-7-metil éter, 3,5,6,7,8,3 ', 4'-heptametoxi- flavona, calicopterina, retusina, 5,4'-di-hidroxi-3,7-dimethoxyflavone, éter lactona-7-metilico do ácido isohemigossílico, hibiscolactona A, hibiscona C, hibiscona D, 2- *O*- metilisona hemigossipolona, escopoletina, benzofenona, 2 $\alpha$ , 3 $\beta$ - di-hidroxilupeno, lupenona, 24-metilenocicloartenol e (23 *E*) -cicloart-23-eno-3 $\beta$ , 25-diol . Os principais compostos voláteis do óleo de flores de *P. aquáticos* do Brasil foram ( *E*, *E* ) - $\alpha$ -farneseno (19,2%),  $\beta$ -cariofileno (11,5%), óxido trans- linalool (piranoide) (7,2%), elemol

(5,6%), fenilacetaldéido (5,3%), óxido *cis* e *trans*- linalol furanoides) (5,2% e 4,2%) e ácido palmítico (4,3%) (LAWAL et al., 2014).

## 3.2 Secagem

### 3.2.1 FUNDAMENTOS

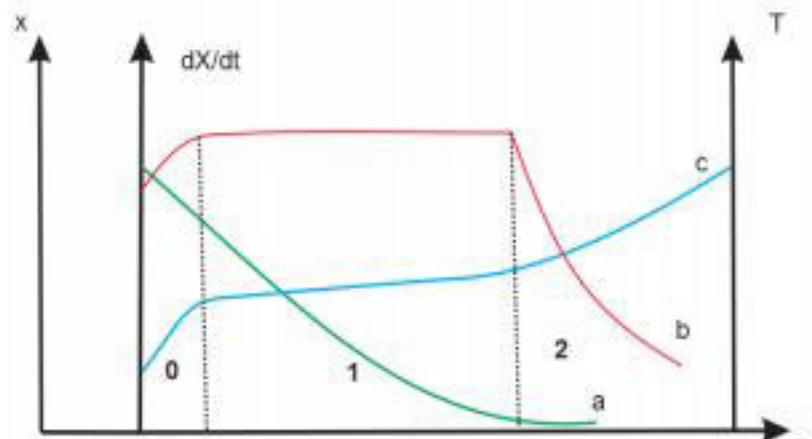
A operação unitária na qual ocorre eliminação de água por transferência simultânea de calor e massa é chamada de secagem. Esta é a maneira mais antiga de conservar alimentos sendo responsável pela remoção de líquido de um material sólido, desidratação, por meio de evaporação ou centrifugação a uma temperatura inferior à de ebulição da água (CLESTINO, 2010)

Apesar de algumas propriedades nutricionais dos alimentos serem degradadas com a secagem, as reações enzimáticas ou de oxidação, dependentes de temperatura, podem levar à alteração de cor, sabor e valor nutritivo dos alimentos, ela apresenta muitas vantagens como a concentração do valor alimentício devido à perda de água, o prolongamento da vida útil do material, a facilidade no transporte e comercialização do produto já que esse torna-se mais leve, compacto e com suas qualidades prolongadas e inalteradas após seco, além de ser um processo economicamente viável que permite diminuir os custos de armazenagem do produto. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material para o ambiente, ela deve ser transportada do interior do sólido até a superfície (CARNEJO et al., 2010).

Os fatores que governam a velocidade dos mecanismos de transferência de calor e massa estão relacionados com a pressão de vapor do material e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, taxa de difusão da água no material, espessura e área da superfície exposta para secagem (ARSDEL et al., 1973).

Uma evolução das transferências simultâneas de calor e de massa ao longo da operação de secagem pode ser encontrada em Park et al. (2002) (Figura 1). Independente da condição do processo, este fenômeno é comum, e a secagem, dessa forma, é dividida em três etapas.

Figura 1: Exemplo de curva de secagem



Fonte: PARK et al. (2007).

A curva (a), que representa a evolução no conteúdo de umidade, mostra o quanto a umidade diminui em relação ao tempo durante o processo de secagem. A curva (b) refere-se à cinética de secagem, indica a velocidade ou a taxa de secagem do produto ( $dX/dt$ ), isto é, a variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, em relação ao tempo (t). A curva (c) representa a evolução de temperatura do produto, ou seja, a variação da temperatura da amostra (T) com o tempo (t) (PARK et al., 2002).

Existem duas formas de secagem, artificial e natural. Na secagem artificial, a fonte de calor pode ser variável. O que caracteriza o método como artificial é o fato de que o processo é executado com o auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas e o ar é forçado através da massa de sementes (CAVARIANI, 1996). A secagem natural é baseada nas ações do vento e do sol para a remoção da umidade do alimento. Tal processo é limitado pelo clima, quando as condições de umidade relativa do ar e temperatura não permitem, ou quando se trata de maiores volumes (MAIA, 1995).

Os equipamentos de secagem, segundo os estudos de Strumillo e Kudra (1986), podem ser classificados de acordo com o fluxo de carga e descarga (contínuo ou descontínuo); pressão utilizada (atmosférica ou vácuo); métodos de aquecimento (direto ou indireto); ou ainda de acordo com o sistema utilizado para fornecimento de calor (convecção, natural ou forçada; condução, radiação ou dielétrico).

### 3.2.2 SECAGEM CONVECTIVA

Se a movimentação do fluido se der por meios externos, artificiais, por exemplo, um ventilador, em que o próprio movimento da superfície está trocando calor, têm-se uma

convecção forçada (INCROPERA et al., 2003). Segundo Strumillo (1986) a secagem convectiva é uma das técnicas de secagem artificial mais empregadas, pois pode ser efetuada em muitos equipamentos, para selecionar os secadores deve-se analisar de fatores como aqueles associados às características do próprio sistema particulado e às propriedades e produções requeridas para o produto final.

Uma das principais mudanças físicas que ocorrem durante a secagem convectiva é o encolhimento. Este encolhimento ocorre devido à perda de água e ao aquecimento, dificultando a reidratação do alimento. Alteração na forma, encolhimento e aumento da dureza são apontados como perda de qualidade em produtos desidratados (BERNSTEIN et al., 2014).

Dentre as várias formas de secagem por convecção forçada, têm-se secagem com leito fixo, leito rotativo, pneumático e jorro. Na secagem de leito fixo os equipamentos têm uma quantidade de grãos adicionada em um silo ou secadores de coluna. Apesar desse processo impossibilitar o uso de grãos com um teor de umidade elevado e um período longo de operação, pode-se realizar a colheita em qualquer ritmo, a operação é simples de alta eficiência energética e não ocorre secagem excessiva. A secagem é realizada por carga, uma certa quantidade de grãos, já secos, é transferida para o silo armazenador (PARK et al., 2007).

Quando as partículas do material no qual se está realizando a secagem fluem junto com a corrente diz-se que está ocorrendo uma secagem com leito pneumático. Depositando-se o produto sobre uma placa perfurada, o ar de passando através do mesmo, fazendo com que o produto comece a flutuar sobre a placa, devida à turbulência provocada pelo ar, se formando um leito fluidizado. O produto é carregado devido a intensidade do fluxo de ar, que supera a velocidade terminal do mesmo. Por ter uma baixa capacidade de secagem e uma elevada potência exigida pelo ventilador, não é comum o uso desse processo para secagem de produtos agrícolas (ALONSO, 2001).

A secagem com leito de jorro assemelha-se à secagem anteriormente explanada. Aqui as partículas tendem a jorrar, flutuar no canal central, com formação de regimes de leito pistonado ou borbulhante. O tamanho das partículas, a velocidade mínima de jorro, altura máxima de jorro estável e a perda de carga em função da velocidade do ar são alguns dos parâmetros no estudo desta secagem (PAVANELLI, 2003; FERNANDES, 2005). Para secagem de produtos agrícolas, tipo amêndoas, esse processo não é comum.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor, o de transferência de massa e o de difusão da umidade no interior do sólido são três importantes parâmetros que podem ser determinados por meio da secagem convectiva (SFREDO, 2002).

### 3.2.3 SECAGEM DE GRÃOS E AMÊNDOAS

Sfredo (2006) relata que no processo de secagem de grãos é necessário que se tenha calor para evaporar a umidade do material e um sorvedor para remover o vapor d'água vindo do material seco. Intencionando-se a evaporação e a extirpação de umidade da parte superior do material, faz-se uso do ar na transferência de calor. A desidratação de alimentos torna-se difícil devido a existência de transferência de calor e de massa em um meio que tem envolvido higroscopicidade e encolhimento.

A secagem de amêndoas é um processo de extrema importância para que não haja deterioração das mesmas durante seu armazenamento, uma vez que submetendo-as a esse procedimento é possível diminuir o teor e água em quantidades precisas para que a fisiologia, o fenótipo, o valor nutritivo e a fisiologia da amêndoa tenham assegurados a qualidade (BAUDET et al., 1999; OHJA, 1974)

### 3.2.4 ATIVIDADE DE ÁGUA

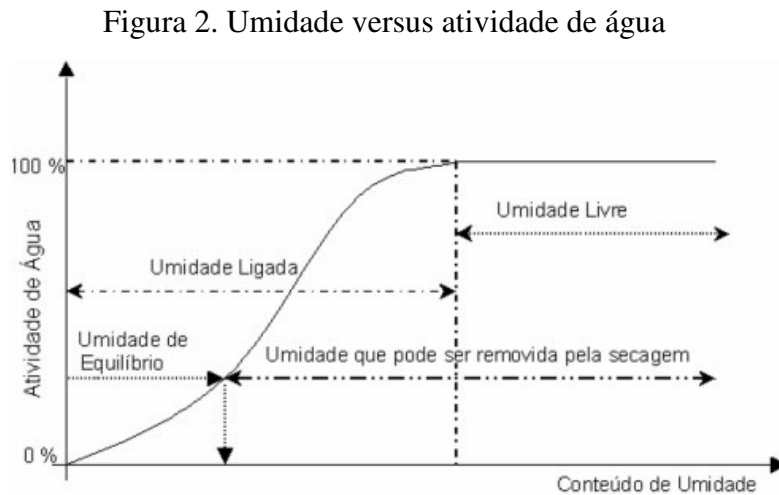
Dentre muitos fatores que não contribuem para o armazenamento, a umidade está na frente, contudo nem toda ela contribui para a putrefação de grãos e amêndoas. Por meio do conceito de atividade de água ( $A_w$ ), que indica o quão forte a água está ligada a diferentes substâncias, pode-se dividir a água disponível nas amêndoas em livre e ligada. A primeira propicia o crescimento de microrganismos e ocorrências de reações químicas, a segunda não está relacionada com o crescimento de microrganismos e não atua nem como solvente nem como reagente (KUDRA, 1998).

O coeficiente de atividade de água,  $A_w$ , está diretamente relacionado ao conceito de estabilidade do alimento, e é determinada pela Equação 1:

$$A_w = \frac{P}{P^0} \quad (1)$$

onde  $P$  é a pressão de vapor de uma solução ou de um material e  $P^0$  é a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura. Dessa forma a água presente no material exerce uma pressão que depende da quantidade de água, da concentração de solutos na água e da temperatura. Por conta do abaixamento de pressão de vapor exercido sobre a solução a atividade de água, matematicamente,  $A_w$  sempre terá um valor inferior a um, que só será atingido quando existir

apenas água (PARK et al., 1992). A Figura 2 mostra a retenção de umidade em função de conteúdo de umidade pela atividade de água.



Fonte: PARK et al., (1992)

### 3.2.5 TRANSFERÊNCIA DE MASSA E CALOR

Para que a secagem aconteça é necessário um tempo, que pode ser dividido em períodos. No início se tem um grão mais frio do que o ar de secagem, dessa forma é necessário o aquecimento do mesmo até que o processo entre em regime de secagem. Depois pode-se verificar a existência e dois períodos: taxa de secagem constante, onde são constantes a taxa de transferência de calor, a temperatura e a taxa de secagem do grão, devido a condição saturada na superfície do mesmo por causa da grande disponibilidade de água livre dentro do grão; e taxa de secagem decrescente, que se inicia no ponto denominado teor de umidade crítico. A superfície do grão não é mais mantida na condição saturada pelo movimento de migração da umidade dentro do grão, reduzindo a transferência de massa. Esta não é mais compensada pela transferência de calor e a taxa de secagem decresce a partir da superfície do grão. A temperatura do produto aumenta e tende a atingir a temperatura do ar. O processo é finalizado quando o grão atingir a umidade de equilíbrio com o ar de secagem. Para qualquer período de secagem a transferência de massa da água evaporada na superfície do sólido para o gás em escoamento pode ser quantificada pela Equação 2 (DISSA et al, 2010):

$$N_w = - \frac{M_{ss}}{A_s} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (2)$$



onde  $N_w$  é a taxa de secagem,  $M_{ss}$  é a massa do sólido seco e  $A_s$  é a área superficial do material que varia com o encolhimento do sólido e  $t$  o tempo.

### 3.3 Modelagem no processo de secagem

#### 3.3.1 MODELOS DIFUSIVOS

Quando a difusão de umidade por líquido ou vapor controla a taxa de secagem, a Equação (3) representa o processo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla_z (D_{\text{eff}} \nabla_z X) \quad (3)$$

onde  $D_{\text{eff}}$  representa o coeficiente de transporte efetivo e  $z$  a coordenada espacial. Curvas de secagem para vários alimentos foram adaptadas por equações de difusão. Esse tipo de difusão é característica de secagem relativamente lenta e não granular, de materiais como gelatina. Durante a secagem por difusão, a resistência à transferência de massa de vapor para a superfície é geralmente muito pequena, e a difusão no sólido controla a taxa de secagem. Contudo, em alguns casos, tanto as resistências internas quanto externas podem ser consideradas (INCROPERA et al., 2003).

Crank (1967) deu soluções analíticas da lei de Fick (Equação 3), com diferentes condições de contorno, válidas para transporte unidimensional, geometria regulares, difusividade constante e distribuição inicial de umidade uniforme. As soluções da lei de Fick para o controle de transferência de massa interna são as seguintes:

- a) Para uma esfera de raio  $R$ :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left( \pi^2 n^2 \frac{D_{\text{eff}}}{R^2} (t - t_0) \right) \quad (4)$$

Exemplos de produtos modelados como esferas incluem produtos agrícolas, cenouras, e trigo parboilizado (MOHAPATRA et al., 2005).

- b) Para uma placa de espessura  $L$  e perda de umidade que ocorre de ambos os lados:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left( -(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}}}{L^2} (t - t_0) \right) \quad (5)$$

São exemplos de alimentos modelados usando uma geometria de placa maçãs, abóboras, batatas, bananas e iogurte (WANG et al., 2007).

c) Para um cilindro de raio R:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\beta_n)^2} \exp(-D_{eff} \beta_n^2 (t - t_0)) \quad (6)$$

onde  $\beta_n^2$  são as raízes da função de Bessel do primeiro tipo e ordem zero. Massas e alho foram modelados usando a solução da lei de Fick para um cilindro (SHARMA et al., 2004).

Em tempos suficientemente grandes, apenas o termo principal da expansão da série [Equações (4) a (6)] precisa ser considerado. O período de tempo de secagem de secagem para uma placa, por exemplo, pode ser obtido da Equação (5) utilizando apenas o primeiro termo da seguinte forma:

$$t - t_0 = \frac{4L^2}{\pi^2 D_{eff}} \ln\left(\frac{8}{\pi^2} MR\right) \quad (7)$$

Esta equação afirma que quando a difusão interna controla o processo, o tempo de secagem varia diretamente com o quadrado da espessura.

Para cálculos mais precisos, a Equação 3 deve ser resolvida por métodos numéricos. Os coeficientes de difusão são tipicamente determinados a partir da inclinação dos segmentos quando os dados experimentais de secagem são plotados em termos de MR versus tempo. As experiências devem ser realizadas sob condições de secagem, particularmente com a velocidade do ar, em que a resistência externa à transferência de massa é insignificante.

Vários grupos de pesquisas fizeram esforços para incluir outros parâmetros importantes no modelo de difusão. Rotstein et al. (1974) estudaram os efeitos da forma da amostra e tamanho na constante de difusividade. Eles concluíram que a área da seção transversal deve ser incorporada em um modelo analítico para descrever a difusividade. Steffe et al. (1980) usaram um modelo mais complexo para incorporar efeitos de forma com difusividade e sem efeitos de transferência de calor e encolhimento.

As Equações de 4 a 6 podem ser usadas para prever as curvas de secagem apenas para mudanças na umidade, pois a difusividade efetiva muda com a umidade e temperatura. No

entanto, estas equações são amplamente utilizadas como média de valores de difusividade com uma boa aproximação para representar as curvas de secagem de produtos alimentícios.

A dependência da difusividade efetiva na temperatura e umidade é geralmente descrita da seguinte forma, por uma equação tipo Arrhenius:

$$D_{eff} = D_0 (X) \exp (-kt) \quad (8)$$

onde  $E_a$  é a energia de ativação, que pode depender do tipo de sólido e do teor de umidade,  $D_0$  é um termo exponencial e  $T$  é a temperatura absoluta.

Xiong et al. (1991) desenvolveram um modelo baseado na afirmação de que a diminuição na difusividade efetiva em menores teores de umidade é resultado de uma diminuição na disponibilidade de moléculas de água para difusão.

### 3.3.2 MODELOS EMPÍRICOS DE CAMADA FINA

Os modelos empíricos e teóricos são mais utilizados para análise de secagem de produtos biológicos. O primeiro baseia-se em investigar, por meio de experimentos laboratoriais, propriedades físicas adimensionais, e está pautado em parâmetros como a temperatura e condições razão da mistura e velocidade do ar de secagem. Mesmo o método sendo capaz de descrever as curvas de secagem, não é possível ao método explicar a energia de ativação e quantidade de água no interior dos produtos. Os modelos teóricos, diferente dos empíricos, conseguem descrever, de maneira satisfatória, o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, dando ainda uma relação entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura (QUEIROZ et al., 1995).

Mesmo em meio a muitas teorias e equações propostas para descrever a variação de água durante a secagem de produtos agrícolas, somente modelos empíricos ou semiteóricos têm sido usados para projetos de secadores, devido à maior precisão no processo de secagem (BROOKER et al., 1992).

Lewis (1921) utiliza a Equação 9, Lei de Newton para o resfriamento, para descrever o movimento de líquido ou vapor em um sólido durante o período de secagem à taxa decrescente:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt) \quad (9)$$

onde  $X$  é o teor médio de água em qualquer instante  $t$ ,  $X_e$  é teor de água na condição de equilíbrio,  $X_0$  é teor de água inicial e  $k$  é a constante de secagem.

Devido à razoável aproximação entre os valores medidos experimentalmente e aqueles calculados pela Equação (9), também conhecida como Lei Exponencial ou Modelo Logaritmo de secagem, passou-se a considerá-la como uma equação que descreve de forma aceitável o fenômeno de transferência de massa durante a secagem por convecção de produtos capilares porosos. O valor  $\frac{X-X_e}{X_0-X_e}$  é geralmente conhecido como razão de umidade, RU, ou adimensional de umidade. O numerador representa a quantidade de água que ainda pode ser removida ou a quantidade de água livre em qualquer tempo  $t$ , enquanto o denominador representa a quantidade total de água disponível para ser retirada pela secagem (CARLESSO et al., 2007).

Page (1949) ao comparar, para a taxa de secagem por convecção de grãos de milho em camada fina, os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos pelo modelo exponencial, concluiu que a equação de secagem pode ser representada por:

$$RU = \exp(-k't) \quad (10)$$

onde  $k'$  representa a constante modificada de secagem.

Apesar de a taxa de secagem obtida com a Equação (10) apresentar valores muito elevados no início do processo, normalmente considera-se que, para sementes, a curva obtida com Equação de Page representa melhor a curva de secagem experimental do que o modelo exponencial. Os termos  $k$  e  $k'$  dependem do tipo de produto, de sua temperatura e, em alguns casos, do cultivar e da umidade relativa do ar (CARLESSO et al., 2007). Carlesso et al. (2005) avaliaram a adequação do modelo de Page para descrição da secagem de sementes de maracujá com teor de água inicial de cerca de 30% b.u. e observaram que a equação obtida não se ajustou às curvas experimentais de secagem.

Simmonds et al. (1953) usaram o modelo matemático descrito pela Equação 11, para a predição da taxa de secagem de uma camada fina de sementes de trigo ou Modelo Exponencial Simples de Dois Parâmetros, desenvolvido considerando-se os efeitos da velocidade, temperatura e razão da mistura do ar de secagem, do tamanho médio das sementes e de sua taxa de redução de volume no decorrer da secagem.

$$RU = a \exp(-k_2 t) \quad (11)$$

Henderson et al (1961) mostraram que os coeficientes genéricos de secagem,  $k$ , não eram constantes e sim dependentes da temperatura do ar e dos mecanismos de difusão de água ou vapor d'água no interior das sementes. Rahman et al (1996); Ertekin et al (2004) têm utilizado os modelos representados pelas Equações 12 e 13 para avaliação da secagem de produtos agrícolas. Os modelos matemáticos de secagem representados por elas são nomeados de Modelos Exponenciais Simples de três parâmetros e Duplo de quatro parâmetros, respectivamente.

$$RU = a_1 \exp(-k_3 t) + b \quad (12)$$

$$RU = a_2 \exp(-k_4 t) + c \exp(-k_5 t) \quad (13)$$

É indispensável o uso de modelos matemáticos para a descrição da taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto (ERENTURK et al., 2004). Os modelos de simulação permitem avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, no teor de água final das sementes, na eficiência do processo em termos energéticos (kJ por kg de água evaporada) e na relação custo/ benefício dos diversos métodos de secagem (CARLESSO et al., 2007).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Matéria prima e preparação das amostras

A Castanha do Maranhão (*Pachira glaba* pasq) foi doada pelo SENAI. A castanha foi armazenada sob refrigeração para posterior uso. Para condições do experimento a castanha foi descongelada em temperatura ambiente e seca com um pano de algodão.

### 4.2 Análises físico-químicas da castanha do maranhão

A Castanha do Maranhão foi caracterizada quimicamente, com amostras em triplicata, de acordo com os métodos de análises da AOAC (2007) (Tabela 1). Os resultados serão expressos com a média das triplicatas e seu desvio padrão.

Tabela 1: Métodos de análise para determinação da composição química de materiais orgânicos.

Análise	Número AOAC	Método	Técnica
Umidade	934.06	Secagem em estufa a vácuo	Determinação gravimétrica da água contida por diferença de peso
Proteína	920.152 e 955.04c	Micro-Kjeldahl	Desnaturação do material orgânico e determinação titulométrica (meio ácido) empregando o Fator F = 6.25
Cinza	900.02	Incineração por mufla	Determinação gravimétrica por diferença de peso
Lipídeos	945.16 e 963.15	Método de Soxhlet	Determinação gravimétrica do estrato etéreo seco por diferença de peso
Carboidratos totais		Indireto	Determinação pelo cálculo: Carboidratos totais = 100 – (Umidade + Proteína + Cinza + Lipídeos)

### 4.3 Determinação das cinéticas de secagem

A Castanha do Maranhão foi submetida à secagem convectiva, nas temperaturas de ar de 30, 45, e 60 °C e velocidade constante (3,0 m/s), de acordo com a descrição do equipamento. Assim, seis castanhas foram mensuradas em três posições (diâmetro maior, comprimento lateral e

comprimento axial) por meio de um paquímetro, e colocadas em duas placas cilíndricas de alumínio (com diâmetro de 9,2 cm e altura de 2,5 cm, previamente pesadas) como indicado na Figura 3.

Figura 3: Amostras de Castanha do Maranhão



Fonte: próprio autor (2018)

Na secagem utilizou-se um desidratador de bandejas com circulação de ar forçado (modelo PE14, Pardal, Brasil) (Figura 4), em que a massa de cada bandeja foi mensurada em intervalos de 5, 10 e 20 minutos ao longo do experimento, usando uma balança de precisão de  $10^{-3}$  g (modelo BL320H, SHIMADZU, Japão). O controle da temperatura e umidade interna do sistema experimental foi medido através de um termo-higrômetro (modelo 7664, INCOTERM, Brasil) (Figura 5).

Figura 4: Desidratador de bandejas com circulação de ar forçado



Fonte: próprio autor (2018)

Figura 5: Termo-higrômetro



Fonte: próprio autor (2018)

Uma vez finalizada a secagem, os resultados do peso das bandejas para cada tempo de secagem foram expressos em base seca (b.s), multiplicando cada massa pela umidade inicial do produto em base seca (NAMSANGUAN et al., 2004; KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006).

#### 4.4 Modelagem e simulação do processo de secagem

A fim de prever a taxa de evaporação da água na Castanha do Maranhão, a difusividade efetiva foi calculada através da Lei de Fick para uma geometria esférica, que estabelece que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração no interior da matriz sólida. Através da solução proposta por Crank (1975) considerando a distribuição de



umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica é determinado o coeficiente difusivo para cada nível de temperatura foi determinado conforme a Equação 14:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_{ef} \pi^2 n^2 t}{R}\right) \quad (14)$$

onde,  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $n$  é o número de termos na série,  $t$  é o tempo de secagem (s) e  $R$  é o raio da amostra (m). A variação do coeficiente de difusão ( $D_{ef}$ ,  $m^2/s$ ) com a temperatura de secagem foi analisada utilizando-se a relação de Arrhenius, Equação 15:

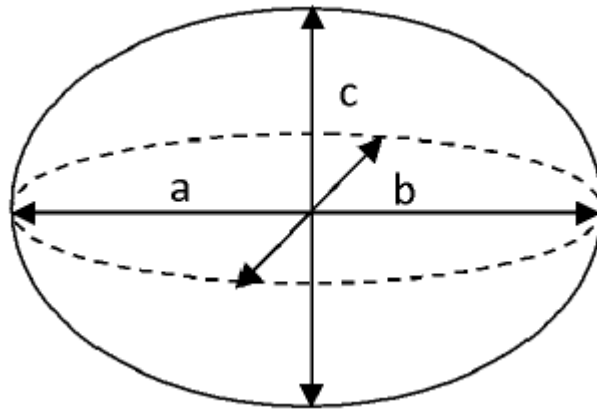
$$D_{ef} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (15)$$

onde  $D_o$  é o fator pré exponencial ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de ativação (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/mol/K) e  $T$  é a temperatura absoluta (K). O coeficiente de determinação foi usado para avaliar a eficiência dos procedimentos matemáticos.

#### 4.5 Medidas de propriedades de forma

A forma e o tamanho da castanha do Maranhão, consideradas esferoides, foram analisados pela esfericidade, circularidade e volume, a partir das medidas em castanhas escolhidas ao acaso in natura individualmente. Foram realizadas leituras das dimensões características, eixos ortogonais, com auxílio de um paquímetro com resolução de 0,01 mm as dimensões características do produto medidas foram: comprimento (a), largura (b) e espessura (c), ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Desenho esquemático dos grãos de amendoim considerados esferoides triaxiais, com suas dimensões características.



Fonte: El-Fawal et al. (2009).

Para a determinação do volume ( $V_g$ ) de cada Castanha do Maranhão foi empregada a equação proposta por Mohsenin (1986), mostrada a seguir:

$$V_g = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (16)$$

onde,  $V_g$  é o volume ( $\text{mm}^3$ ),  $a$  é o comprimento (mm),  $b$  é a largura (mm) e,  $c$  é a espessura, (mm).

Já as propriedades de forma como a esfericidade e circularidade foram determinadas pelas Equações 17 e 18 proposta por (TSCHEUSCHNER, 1987):

$$E_s = \frac{(abc)^{\frac{1}{3}}}{a} 100 \quad (17)$$

$$C_r = \frac{b}{a} 100 \quad (18)$$

onde  $E_s$  é a esfericidade (%) e  $C_r$  é a circularidade (%) (TSCHEUSCHNER, 1987).

#### 4.7 Estimativa dos parâmetros e análise estatística

Os parâmetros dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem foram estimados através das funções do programa Matlab® R2011b (The Mathworks Inc., Natick, MA, USA).

Para as análises de regressão foram usadas as funções “nlinfit” e “nlparci” considerando a alternativa “robust” de análise. A função nlinfit utiliza o algoritmo Gauss-Newton com modificações de Levenberg-Marquardt para mensurar iterativamente os valores da resposta e recalculá-lo com base nos mínimos quadrados para um modelo não linear, enquanto a função nlparci estima os intervalos de confiança dos parâmetros do ajuste ( $\alpha = 95\%$ ).

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{adj}$ ) (Eq. (19)), o erro médio relativo ( $MRE$ ) (Eq. (20)) foram usados para avaliar a eficiência dos procedimentos matemáticos. O parâmetro estatístico  $R^2_{adj}$ , conhecido como a variação explicada, ajusta o coeficiente de determinação baseado no número de parâmetros do modelo, sendo um critério que define o sucesso do modelo ao mesmo tempo em que avalia a variação dos dados experimentais. Tem importante utilidade quando se compara modelos com um número diferente de coeficientes embutidos. O parâmetro estatístico  $MRE$  é um critério que avalia a precisão das estimativas (VILLA-VÉLEZ et al., 2012; CANO-HIGUITA et al., 2015).

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^*|}{X_i^*} \quad (19)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-n_p} \right) (1 - R^2) \quad (20)$$

onde,  $R^2$  é o coeficiente de determinação entre os valores experimentais e calculados pelo melhor modelo de ajuste,  $X$  e  $X^*$  representam os valores experimentais e os valores calculados,  $n$  é o número de dados experimentais e  $n_p$  é o número de parâmetros do modelo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5.1 Caracterização química

A Tabela 2 apresenta os valores da composição química da Castanha do Maranhão. No que tange à umidade tem-se 41,40%, referente aos lipídios e proteínas, os valores foram, respectivamente, de 3,62% e 2,67%, 36,30% para as cinzas e 16,01% para carboidratos. Ferreira et al., (2006) apresentou, para a Castanha do Brasil valores de 3,15% para a umidade, 61% para lipídios, 15,60% para proteínas, 3,13% de cinzas e 17,12% para carboidratos. Melo et al., (1998) encontrou, para a castanha de caju valores de 5,05%, 46,28%, 22,11%, 2,40% e 7,93% para os mesmos parâmetros citados, respectivamente, anteriormente. Já Rodrigues et al., (2011) apresentou valores de 4,35% para a umidade, 67,52% para lipídios, 14,28% para proteínas, 4,07% em cinzas e 3,64% para carboidratos.

É notório a discrepância entre algumas das composições da Castanha do Maranhão com as demais castanhas analisadas previamente por outros autores, em relação à umidade e às cinzas, apresenta maiores valores do que todas as outras, a porcentagem de carboidratos é similar ao encontrado na Castanha do Brasil e bem diferente das demais. Em contrapartida, enquanto as castanhas do Brasil, de caju e do Pará apresentam elevados teores em lipídios, a Castanha do Maranhão possui uma porcentagem até 16 vezes menor do que a média percentual das outras encontradas na literatura.

Quando se trata de conservação de alimentos, deve-se levar em consideração a umidade, esta, determina a estabilidade, qualidade e tempo de vida do produto. Este parâmetro também está relacionado com as possíveis alterações que os alimentos podem estar suscetíveis, se baixa, o alimento pode desidratar e se elevada pode absorver água do ambiente, propiciando a perda da qualidade devido ao desenvolvimento de fungos (GAVA, 2008). No caso da amostra de Castanha do Maranhão o valor de umidade encontrado foi de 41,40 g em 100g de castanha (TABELA 2), o que sugere ser muito perecível.

A Tabela TACO (BRASIL, 2011) preconiza para castanhas em geral um percentual de no máximo 5% em cinzas, o que vai ao encontro dos valores obtidos na literatura para as demais castanhas e muito diferente do encontrado na análise para a Castanha do Maranhão. Eckert et al., (2014) em um estudo sobre sementes de chia e linhaças, também encontrou valores acima do esperado, explicou a diferença percentual pelo local de armazenamento, que poderia ter resquícios de matéria inorgânica ou algum contaminante como insetos, o que fez diferirem os resultados. Já Nobre et al., (2016) analisando castanhas de caju, encontrou valores 5 vezes maior do que esperado, atrelou essa discrepância ao fato do material em estudo ter recebido, de forma proposital, uma quantidade de NaCl.

Tabela 2: Composição química da Castanha do Maranhão

<b>Propriedade</b>	<b>Valor (% b.s)</b>
<b>Umidade</b>	41,40
<b>Lipídios</b>	3,62
<b>Proteínas</b>	2,67
<b>RMF- cinzas</b>	36,30
<b>Carboidratos</b>	16,01

Fonte: próprio autor (2018)

## 5.2 Cinética de secagem

Foram obtidas experimentalmente curvas de secagem do conteúdo de água em função do tempo para semente da castanha do maranhão, a três níveis de temperatura como descrito na Tabela 3, nesta, observa-se que ao decorrer o tempo, o conteúdo de umidade das amostras sofre um decaimento em todas as temperaturas, essa queda é mais acentuada no início do processo, uma vez que, observando as diferentes temperaturas de secagem, a medida em que ocorre um incremento da temperatura, para um nível de umidade constante, ocorre uma redução no conteúdo de umidade final do material. Este comportamento foi descrito por Tonon et al., (2009) onde um aumento da temperatura no meio do processo, ocorre maior diferença de temperaturas entre a amostra e o ar de secagem, ocasionando maior interação de transferência de calor e massa entre a semente e o ar dessecante. Comportamento similares foram descritos por Melo et al., (2015) para a pimenta de cheiro, Santos et al., (2010) para banana, Simal et al., (2005) para o kiwi e Tripathy et al., (2008) para tomates.

Tabela 3: Resultados experimentais do conteúdo de umidade às diferentes temperaturas de secagem\*.

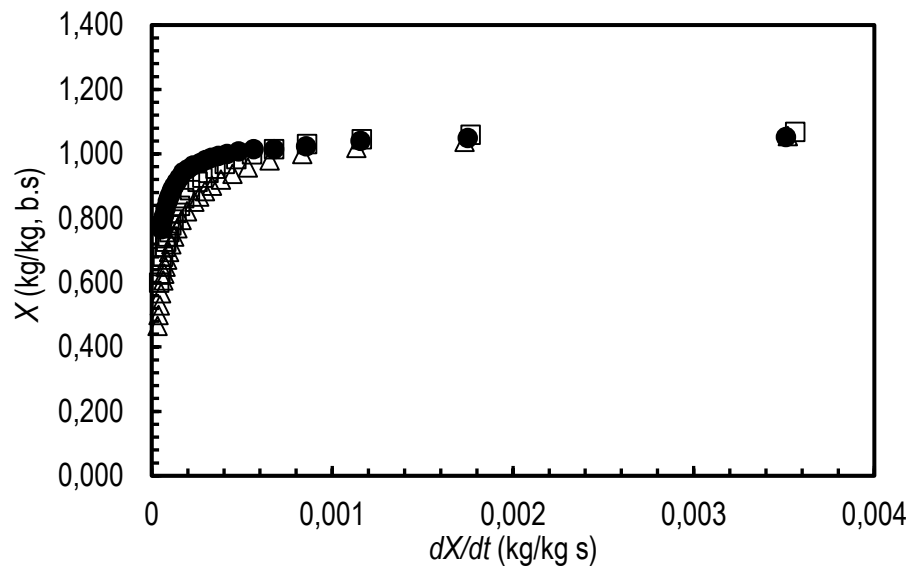
<i>t</i> (s)	<i>X</i> (kg/kg, b.s.)		
	<i>T</i> (30 °C)	<i>T</i> (45 °C)	<i>T</i> (60 °C)
0	1,070±0,000	1,070±0,000	1,068±0,000
300	1,053±0,000	1,068±0,001	1,056±0,003
600	1,049±0,002	1,059±0,003	1,038±0,003
900	1,041±0,003	1,046±0,006	1,019±0,003
1200	1,024±0,002	1,031±0,008	1,000±0,001
1500	1,015±0,003	1,015±0,009	0,980±0,002
1800	1,014±0,005	0,999±0,011	0,958±0,003
2100	1,008±0,005	0,984±0,012	0,938±0,003
2400	1,000±0,006	0,969±0,012	0,921±0,003
2700	0,994±0,007	0,954±0,013	0,902±0,002
3000	0,988±0,007	0,941±0,012	0,884±0,002
3300	0,982±0,008	0,927±0,013	0,868±0,002
3600	0,972±0,009	0,914±0,013	0,852±0,001
4200	0,964±0,010	0,888±0,014	0,822±0,001
4800	0,952±0,010	0,863±0,014	0,795±0,001
5400	0,983±0,031	0,839±0,015	0,769±0,000
6000	0,927±0,012	0,817±0,016	0,744±0,001
6600	0,913±0,013	0,797±0,016	0,719±0,001
7200	0,901±0,013	0,778±0,018	0,696±0,002
7800	0,889±0,013	0,757±0,017	0,672±0,001
8400	0,877±0,014	0,743±0,017	0,650±0,003
9000	0,864±0,014	0,727±0,017	0,628±0,002
9600	0,853±0,014	0,711±0,016	0,607±0,003
10800	0,830±0,016	0,681±0,015	0,568±0,002
12000	0,807±0,018	0,652±0,016	0,529±0,001
13200	0,786±0,019	0,625±0,015	0,499±0,001
14400	1,956±0,025	1,787±0,077	1,313±0,172

*X* é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.), *t* é o tempo (s) e, *T* é a temperatura (°C). \*Média e desvio padrão da duplicata.

Fonte: próprio autor (2018)

Além disso, determinou-se as taxas de secagem (Figura 7) onde foi observado que o processo de secagem da semente da Castanha do Maranhão ocorreu, significativamente, no período de taxa decrescente, onde a difusão é o principal mecanismo físico que governa o movimento da umidade nas amostras (DOYMAZ, 2012). Segundo Park et al., (2014) este comportamento é visto na grande parte dos produtos biológicos, onde as condições de secagem são tais que, a resistência de transferência de massa encontra-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja superior à taxa de reposição de umidade no interior à superfície do material. Provavelmente, em temperaturas elevadas, toda a água livre presente na superfície do material, evapora rapidamente, impossibilitando a formação de um período de taxa constante (FIORENTIN, 2010).

Figura 7: Taxa de secagem das curvas de secagem da Castanha do Maranhão nas temperaturas de 30 (●), 45 (□) e 60 °C (Δ).



Fonte: próprio autor (2018)

Observa-se, ainda, na Figura 7 que a elevação da temperatura resultou num efeito positivo sobre a taxa de secagem. Segundo Vigano et al., (2012), a cinética de secagem está diretamente relacionada com a temperatura do processo, o aumento na temperatura resulta em maior transferência de umidade. O mesmo pode ser verificado com o aumento da temperatura no intervalo de 30 a 60 °C, essa transferência de umidade foi mais proeminente com a elevação da temperatura para 60 °C. Pontes et al., (2009) em seu estudo de secagem de pimentas, verificou que a temperatura de secagem exerce influência sobre a velocidade de secagem do produto, sendo o tempo de secagem menor com o aumento da temperatura. Esse comportamento deve-se ao fato das maiores taxas de remoção de água do produto ocorrerem nas maiores temperaturas, o que reduz o tempo de secagem.

### 5.3 Modelagem matemática das curvas de secagem

Os valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) obtidos pelo modelo teórico difusivo (geometria esférica) para os diferentes tratamentos são apresentados na Tabela 4. Para isto, foi usado na simulação como raio da esfera  $R = 0,0114$  m e como umidade inicial ( $X_0$ ) e de equilíbrio ( $X_e$ ), o primeiro e último valor para cada curva de secagem no nível de temperatura de estudo, respectivamente.

Tabela 4: Resultados da modelagem e simulação das curvas de secagem empregando o modelo Difusivo para geometria esférica.

$T$ (°C)	$D_{ef}$	$R^2$	$MRE$ (%)
<b>30</b>	$1,216 \times 10^{-7}$	0,962	4,015
<b>45</b>	$1,546 \times 10^{-7}$	0,942	7,806
<b>60</b>	$1,562 \times 10^{-7}$	0,941	10,148

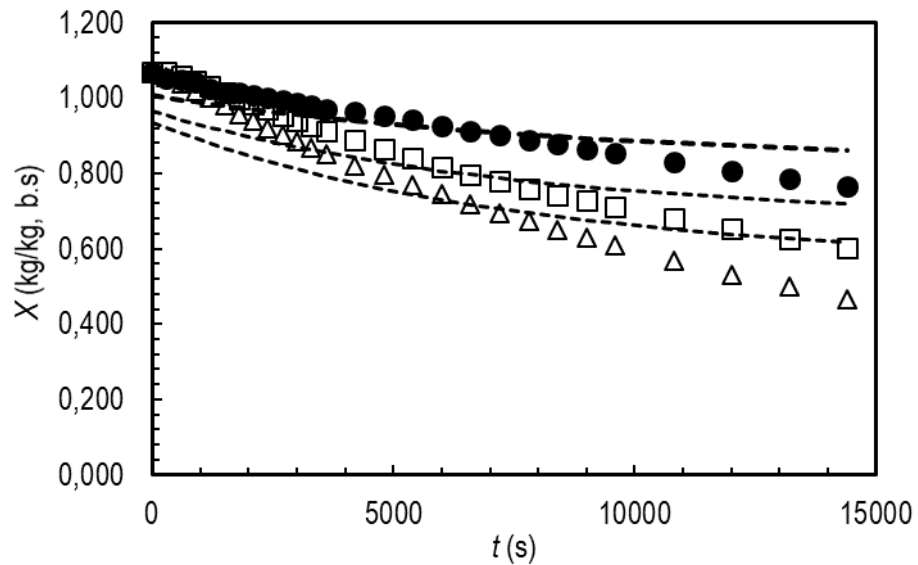
Fonte: próprio autor (2018)

Nesta, observa-se que os valores de difusividade efetiva aumentaram com a elevação de temperatura de secagem, tendo uma variação de  $1,216 \times 10^{-7}$  a  $1,562 \times 10^{-7}$ , utilizando-se o modelo difusivo para geometria esférica, demonstrando a diminuição das resistências internas do processo de secagem, onde a elevação da temperatura diminui a pressão do líquido e sua resistência à evaporação, facilitando a difusão das moléculas no material (RIZVI, 2005). A difusividade efetiva depende das características do ar de secagem e das demais propriedades físico-químicas do material que se relacionam a espécie e variedade, sendo que os valores de difusividade efetiva para produtos alimentícios se encontram na faixa de  $10^{-11}$  a  $10^{-10}$  (ZOGZAS et al., 1996). Estes resultados são condizentes com os obtidos para produtos como gengibre (GOUVEIA et al., 1999), pêra (PARK et al., 2001), manga (GOYAL et al., 2006), feijão (ALMEIDA et al., 2009) e batata-doce (DOYMAZ, 2012).

Na modelagem, foi visto que na temperatura de 60 °C o  $MRE$  foi de 10,148 %, bem no limite de consideração como “eficiente”. Isto se deve à variação do raio em algumas amostras, onde uma vez fixado no modelo, foram obtidas curvaturas menos pronunciadas no final da secagem como mostrado na Figura 8. Para Villa-Vélez et al., (2012) o uso de umidades de equilíbrio ( $X_e$ ) através de isothermas de sorção possibilitariam o aumento da inclinação dessas curvaturas, sendo que a umidade  $X_e$ , nesse caso, não dependeria do último valor experimental das cinéticas de secagem e da variação do raio.

Figura 8: Curvas de secagem da Castanha do Maranhão nas temperaturas de 30 (●), 45 (□) e 60 °C (Δ) e simuladas pelo modelo Difusivo para geometria esférica (Equação 4).





Fonte: próprio autor (2018)

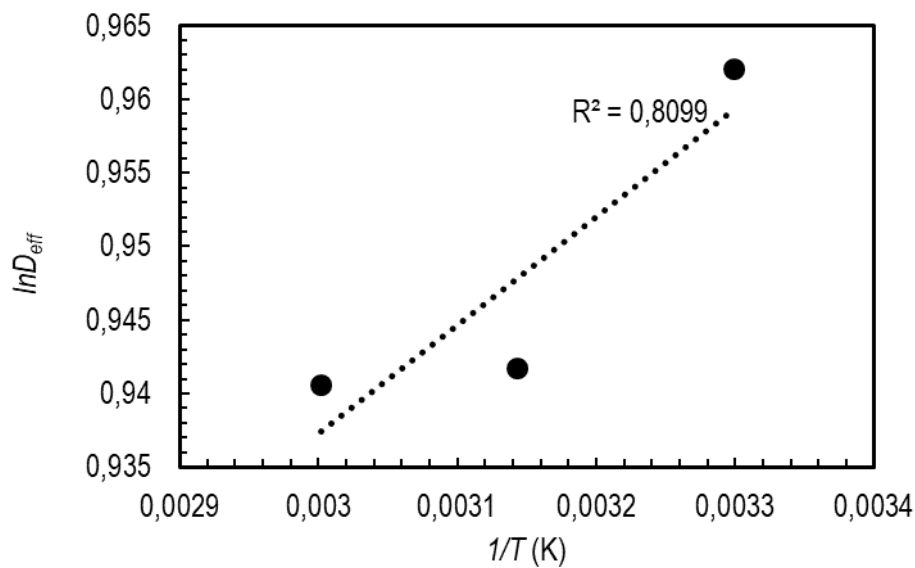
#### 5.4 Difusividade efetiva da secagem da Castanha do Maranhão

A determinação do coeficiente de difusão e da energia de ativação foi determinada através da metodologia descrita no item 4.4. Os resultados mostram um valor de  $E_a = 0,608$  kJ/mol e  $D_0 = 0,718$  m<sup>2</sup>/s provenientes da relação tipo Arrhenius como indicado na Equação 15 e representado pela Equação 21:

$$D_{eff} = 0,718 e^{\left(\frac{608,7}{RT}\right)} \quad (21)$$

Os valores calculados de  $D_{eff}$  para cada temperatura estão apresentados na Figura 9 na forma de “ $\ln D_{eff}$ ” plotados em função da temperatura absoluta ( $1/T$ ). Observa-se que o ajuste linear obtido indica que houve uniformidade de variação da difusividade com a temperatura, sendo que o valor obtido do coeficiente de difusividade obtido a 60 °C, um pouco superior em relação às temperaturas de 30 e 45 °C. De acordo com Goneli (2007), este comportamento pode ser explicado em razão da vibração molecular da água, pois a variação do coeficiente difusivo se dá com o aumento da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas da água contribuindo para uma difusão mais rápida. Desse modo, pode-se afirmar que houve uma difusão maior na temperatura de 60 °C.

Figura 9: Relação tipo Arrhenius entre o coeficiente difusivo da água para a Castanha do Maranhão e a temperatura.



Fonte: próprio autor (2018)

Kashaninejad (2007) diz que a energia de ativação do processo difusivo é a energia mínima necessária para inicia-lo. Na difusão da água durante a secagem da Castanha do Maranhão, obteve-se uma energia de ativação de 0,608 kJ/mol. Este resultado não se encontra em conformidade com a literatura, de acordo com Zogzas et al. (1996), para secagem de produtos agrícolas os valores podem variar de 12,7 a 110 kJ/mol, isso justifica-se pelo alto conteúdo de umidade do produto e água contida nos interstícios é retirada facilmente, necessitando, dessa forma, de uma baixa energia de ativação. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação maior será a difusividade de água no produto (GONELI, 2007). Um produto rico em componentes como lipídeos e proteína tende a criar uma pressão interna intersticial que permite a liberação e saída da água para o sistema, o que não é o caso da Castanha do Maranhão (PURSCHKE et al., 2018).

### 5.5 Medidas de propriedades de forma da Castanha do Maranhão

Saber as características físicas dos produtos agrícolas é de fundamental importância para a otimização de parâmetros para projetos de equipamentos agrícolas como máquina de separação e de limpeza, usados durante a produção, manuseamento e estocagem desse material. Sendo assim, conforme o item 4.5, foram escolhidas 15 castanhas de forma aleatórias e feita a medida em três dimensões (comprimento, largura e espessura), os valores estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5: Medidas de propriedade de forma e tamanho da semente da Castanha do Maranhão.

Amostras	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Esfericidade (%)	Circularidade (%)
1	30,9	28,6	20,4	9439,6	84,8	92,5
2	29,2	29,3	21,1	9452,8	89,8	100,3
3	28,7	29,8	20,4	9135,4	90,3	103,8
4	30,9	30,1	19,9	9691,2	85,6	97,4
5	31,7	30,5	16,5	8353,0	79,4	96,2
6	28,8	29,7	16,1	7210,6	83,2	103,1
7	29,3	29,8	19,4	8869,2	87,6	101,7
8	30,2	30,3	18,1	8672,5	84,4	100,3
9	29,2	28,4	18,5	8032,8	85,1	97,2
10	29,3	28,1	20,9	9009,9	88,1	95,9
11	26,7	28,9	19,7	7959,3	92,7	108,2
12	30,8	30,2	19,4	9448,4	85,1	98,0
13	27,1	28,1	22,2	8851,7	94,7	103,7
14	29,1	28,8	16,3	7152,7	82,1	98,9
15	27,9	27,6	18,8	7580,0	87,3	98,9
<b>Média</b>	<b>29,3</b>	<b>29,2</b>	<b>19,2</b>	<b>8590,5</b>	<b>86,7</b>	<b>99,7</b>

Fonte: próprio autor (2018)

Os valores variaram de 26,7 mm a 31,7 mm para o comprimento, com média 29,3 mm, 27,6 mm a 30,5 mm para a largura, com média 29,2 mm e de 16,1 mm a 22,2 mm para espessura, com média de 19,2 mm. Quando comparada a outros produtos agrícolas, como com trigo que têm valores médio de comprimento de 6,30 mm, 3,78 mm e 3,20 mm para comprimento, largura e espessura, nota-se que a semente da Castanha do Maranhão tem medidas significativamente maiores, já em relação a grãos de fava e milho a diferença média desse valores se reduz, já que se tem 16,25 mm e 12,02 mm; 13,75 mm e 8,68 mm; e 9,25 mm e 4,45 mm respectivamente para as medidas da três dimensões desses grãos.

A Tabela 5 mostra também os valores do volume, 8590,5 mm<sup>3</sup>, esfericidade, 86,7%, e circularidade, 99,7%, da semente da Castanha do Maranhão. Akintayo (2004) diz que quanto mais próximos os valores de esfericidade e circularidade, mais semelhante a uma esfera será o produto, dessa forma, por meio desses parâmetros nota-se que o referido material de estudo não apresenta uma semelhança tão relevante, diferente do que ocorre com os grãos de feijão, em Resende et al (2008), que apresentam esfericidade e circularidade, respectivamente, de 71,97% e 71,25%.



## 6 CONCLUSÕES

A partir da secagem por convecção forçada, foi possível diminuir consideravelmente o conteúdo de umidade da Castanha do Maranhão, o que viabiliza, sob o ponto de vista da conservação, diversas aplicações industriais para a mesma. Durante o processo de secagem notou-se a tendência da difusividade efetiva de aumentar com a elevação da temperatura do ar de secagem. Isto indica que a temperatura do ar de secagem influencia o coeficiente de difusividade efetiva, e assim, a velocidade da secagem. Logo, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior será a velocidade de secagem. Também, foi demonstrada através da equação de Arrhenius a dependência do coeficiente de difusão em relação à temperatura, com valores de energia de ativação não estando na mesma faixa encontrada para a maioria dos produtos agrícolas, devido à sua alta umidade. Verificou-se também a alta taxa de umidade das Castanha do Maranhão, 58,60%, cuja composição possui 2,67% de proteínas e 3,62% de lipídios. Por meio das propriedades de forma pôde-se também comprovar a semelhança da castanha com um modelo esferoide, com uma esfericidade equivalente a 86,71%, circularidade de 99,77%, e um volume, 8590,54 mm<sup>3</sup>. Sendo assim, o referido trabalho possibilita a realização de estudos mais aprofundados da secagem da Castanha do Maranhão, sobre as propriedades termodinâmica e outras variáveis que possam influenciar no processo, como a velocidade do ar e a espessura do material. Bem como uma melhor observação das suas características físico-química e a repetição de alguns experimentos para se ter uma confiabilidade maior nos dados obtidos neste trabalho, descrevendo melhor sua composição, especialmente, em relação às cinzas.

## REFERÊNCIAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. **Comparação de Modelos Matemáticos Para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de Sementes de Feijão**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental. Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AKINTAYO, E. T. Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes. *Bioresource Technology*, v. 92, p 307-310, 2004.

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SAL, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science Technology**, v.2, p.72 - 83, 2009.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2001.

AOAC. **Official methods of analysis** Gaithersburg: AOAC International 2007.

ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J.; MORGAN JUNIOR, A. **Food dehydration: drying methods and phenomena**. 1973. Westport: Avi, v. 1, 350 p.

BALBI, M. E.; PENTEADO, P. T. P. S.; CARDOSO, G.; SOBRAL, M. G.; SOUZA, M. G. Castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa* Bonpl.): composição química e sua importância para saúde. *Visão Acadêmica*, v.15, n.2, p 51-62, Curitiba. 2014.

BAUDET, L.M.L.; VILLELA, F.A.; CAVARIANI, C. **Princípios de secagem**. Seed News, Pelotas-RS, n.10, p.20-27,1999.

BERNSTEIN, A.; NORENA, C. P. Z. **Study of thermodynamic, structural, and quality properties of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) during drying**. *Food and Bioprocess Technology*, Chicago, v. 7, n. 1, p. 148-160, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Tabela brasileira de composição de alimentos – TACO**. NEPA-UNICAMP, 2011. Disponível em: <http://www.cfn.org.br/wp->

content/uploads/2017/03/taco\_4\_edicao\_ampliada\_e\_revisada.pdf. Acesso em: novembro de 2018.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying Cereal Grain**. Westport: The AVI Publishing Co. 1974.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS, V. R. N. **Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach**. Food and Bioproducts Processing, v. 93, p. 19-28, 2015.

CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; VIANA, A.P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R.G. **Secagem de sementes de maracujá em camada delgada**. Revista Brasileira de Fruticultura, v.27, n.3, p.444-448, 2005.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies arbóreas brasileiras** / Paulo Ernani Ramalho Carvalho. - Brasília, DF: Embrapa informações Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2014. 634 p. Il color; (Coleção espécies Arbóreas, v.5).

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Esalq-USP.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. – Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081; 276).

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 1 ed. New York: Oxford University Press, 1975. 411 p.

CORNEJO, F. E. P.; NOGUEIRA, R. I.; WILBERG, V. C. **Secagem Como Método de Conservação de Frutas**. Dezembro, 2003. Disponível em:<

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/415605/1/2003DOC0054.pdf>>. Acesso em: outubro de 2018.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem Matemática e Determinação das Propriedades Termodinâmicas do Café (Coffea arabica L.) Durante o Processo de Secagem.** Revista Ceres, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

DISSA, A. O.; DESMORIEUX, H.; SAVADOGO, P. W.; SEGDA, B. G. e KOULIDIATI, J. **Shrinkage, porosity and density behavior during convective drying of Spirulina.** Journal of Food Engineering. v. 97, p. 410 – 418, 2010.

DOYMAZ, I. **Infrared drying of sweet potato (Ipomoea batatas L.) slices.** Journal of Food Science and Technology. V 49 (6), p. 760-766, 2012.

EL-FAWAL, Y. A.; TAWFIK, M. A.; EL-SHAL, A. M. Study on physical and engineering properties for grains of some filed crops. **Misr Journal of Agricultural Engineering**, v. 26, n. 4, p. 1933-1951, 2009.

ERENTURK, S.; GULABOGLU, M.S.; GULTEKIN, S. **The thinlayer drying characteristics of roship.** Biosystems Engineering, Oxford, v.89, n.2, p.159-166, 2004.

ECKERT, RAQUEL GORETI.; ALMEIRA. P. G. O. **Análise centesimal e dosagem de ômega 3 em semente de chia e semente de linhaça.** Revista Varia Scientia Agrárias v. 04, n.01, p. 49-64, Cascavel. 2014.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. **Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model.** Journal of Food Engineering, v.63, n.1, p.349-359, 2004.

FERNANDES, C. F. **Análise da Eficiência Energética da Secagem de Pasta em Leito de Jorro.** Dissertação de Mestrado, UFSCar, São Carlos, SP, p. 80, 2005.

FERREIRA, E. S.; LUCIEN, C. S.; AMARAL, A. S. **Caracterização físico-química da amêndoa, torta e composição dos ácidos graxos majoritários do óleo bruto da castanha do**



**Brasil (Bertholletia excelsa H.B.K).** Brazilian Journal of food and nutrition. Araraquara. v.17,n.2, p203-208, 2006.

FIorentin, L. D.; MENON, B.T.; ALVES, J. A.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; MÓDENES, A. N. **Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja.** Acta Scientiarum. Technology, Maringá, v. 32, n. 2 p. 147-152, 2010.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações.** São Paulo: Nobel, 2008.

GONELI, A. L. D. **Dinâmica da variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade das sementes de mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento sob condições controladas.** Viçosa: UFV, 2007. 192p. (Tese Doutorado)

GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; MURR, F. E. X. **Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (Zingiber officinale, Roscoe) durante a secagem.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.1, n.1, p.51-58, 1999.

GOYAL, R. K.; KINGSLY, A. R. P.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. **Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices.** Biosystems Engineering. v.95, p.43-49, 2006.

HENDERSON, S.M.; PABIS, S. **Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, v.6, n.3, p.169-174, 1961.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 4, p. 531-537, 2006.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. **Thin Layer Drying Characteristics and Modeling of Pistachio Nuts.** Journal of Food Engineering, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice.** New York: Pergamon Press, 1972.

KUDRA, T. **Instantaneous Dryer Indices for Energy Performance Analysis**. Inzynieria Chemiczna i Procesowa. v. 19, n.1 p.163-172, 1998.

LAWAL, A. O; OGUNWANDE, I. A; SALVADOR, A. F; SANNI, A. A; OPOKU, A. R. **Pachira glabra Pasq. Essential Oil: Chemical Constituents, Antimicrobial and Insecticidal Activities**. J. Oleo. Sci. Vol 63, n 6, p. 629-635, 2014.

LEWIS, L.W. **The rate of drying of solid materials**. Industrial Engineering Chemistry, v.13, n. 1, p. 427, 1921.

LIMA, A. R. C. DE; SANTOS, F. S. DOS; SILVA, R. M. DA; LEITE, D. D. F.; FIGUEIREDO, R. M. F. DE. **Modelagem Matemática da Cinética de Secagem da Casca de Umbu-Cajá**. Revista Brasileira de Agrotecnologia. v. 7, n. 2, p. 97 – 103, 2017.

LORENZI, H.; BACHER, L.; LACERDA, M.; SARTORI, S. **Frutas brasileiras e exóticas e cultivadas: (de consumo in natura)**. São Paulo: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, p. 640, 2006.

MAIA, M. **Secagem de sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) com ar ambiente forçado**. 1995. 108f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – UFPel.

MARTINS, C. ROBERTO; JESUS JÚNIOR, L. A. **Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014**. Agosto, 2014. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/122994/1/Producao-e-comercializacao-Doc-184.pdf>>. Acesso em: Agosto de 2018.

MELO, J. C. C.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, K. P.; COSTA, C. H. C.; FEITOSA, R. M. **Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Paraíba, v.10, n.2, p.09, 2015.

MELO, M.L.P.; MAIA, G.A.; SILVA, A.P.V.; FIGUEIREDO G.S.F. **Caracterização físico-química da amêndoa da castanha de caju (*Anacardium occidentale* L.) crua e tostada.** Food Science and Technology. v. 18, n. 2, Campinas.1998.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. **A thin layer drying model of parboiled wheat,** J. Food Eng., 66, 513–518, 2005.

NAMSANGUAN, Y.; TIA, W.; DEVAHASTIN, S.; SOPONRONNARIT, S. **Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two-stage drying process.** Drying Technology, v. 22, n. 4, p. 759-778, 2004.

NEVES, E.; PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; BAUDET, L.; PERES, W. B. **Secagem de sementes de milho em espiga, em função da altura da camada e fluxo de ar.** Revista Brasileira de Sementes, v. 27, n. 2, p.117-124, 2005.

NOBRE, C. V. F.; MATOS, M. P.; LIMA, A. T. O.; ARAGÃO, M. F. **Determinação do teor de umidade e de minerais em castanha de caju torrada e salgada.** Sobral. 2016.

OHJA, T.P. **Drying of paddy in post-harvest prevention of waste and loss of food grain.** Tóquio: Asia Productivity Organization, 375 p, 1974.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers.** 1949. MS Thesis – Purdue University, West Lafayette, 1949.

PARK, K. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. **Secagem: Fundamentos e equações.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.16, n.1, p.93-127, 2014.

PARK, K. B.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. **Estudo de secagem de pêra barillett (*Pyrus sp.*).** Ciênc. Tecnol. Alimentos, Campinas, 21(3): 288-292, 2001.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. G. de; PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem.** Campinas. Março, 2007. Disponível em:

<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAqWqEAI/conceitos-processo-secagem>>. Acesso em: Agosto de 2018.

PARK, K. J.; ANTONIO. G. C; OLIVEIRA. R. A; PARK. K. L. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. CT&EA, Campinas – SP 2007.

PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. **Modelos de ajuste de isothermas de sorção de alimentos**. In: Engenharia Rural, Piracicaba: ESALQ/USP. v. 3, n. 1, p.81-86, 1992.

PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. **Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.)**. Journal of Food Engineering, Londres, v. 51, n. 3, p. 193-199, 2002.

PAVANELLI, P. E. **Controle PID Aplicado à Secagem Contínua de Pasta em Leito de jorro**. São Carlos SP, PG-EQ/UFSCar, 83p. (Trabalho de Graduação), 2003.

PEIXOTO, A. L.; ESCUDEIRO, A. **Pachira aquatica (Bombacaceae) na obra “história dos Animais e Árvores do Maranhão” de Frei Cristóvão de Lisboa**. Rodriguésia, Rio de Janeiro, v.53, n.82, p.123-130, 2002.

PRADO, M. M. **Secagem de sementes de mamão papaya**. Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos-SP, 108 p., 1999

PONTES, S. F. O.; SANTOS, C. T.; FERREIRA, R. C; PONTES, V. L; FONTAN, R. C. I. **Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*capsicum chinense*) a diferentes temperaturas**. Rev. bras. prod. Agroind., v. 11, n. 2, p. 143-148, 2009.

PURSCHE, B.; BRÜGGEN, H.; SCHEIBELBERGER, R.; JÄGER, H. **Effect of pre-treatment and drying method on physico-chemical properties and dry fractionation behaviour of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.)**. European Food Research and Technology, v. 244, n. 2, p. 269-280, 2018.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59p.

RAHMAN, M.S.; PERERA, C.O. **Effect of pre-treatment on air drying rate and thin layer drying of fresh cherry**. INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 10., 1996, Krakow. Proceedings... Krakow, 1996. p.1053-1060.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 10, n. 1 p. 17-28, 2008.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A. e RIZVI, S. S. H. (Ed.). **Engineering Properties of Foods**. 3. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. cap. 7, p.259-346.

RODRIGUES, A. B. L.; RAMOS, R. S.; ALMEIDA, M. D. C.; COSTA, J. S.; ALMEIDA, S. S. M. S. **Caracterização físico-química da amêndoa in natura e avaliação sensorial do produto do beneficiamento da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*)**. 51º Congresso Brasileiro de Química. São Luís. 2011

ROTSTEIN, E.; LAURA, P.A.; CEMBORAIN, M.E. **Analytical prediction of drying performance in unconventional shapes**, J. Food Sci., 39, 627, 1974.

SANTOS, P. dos; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SILVA, F. T. C. da; FURTADO, G. F. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem em diferentes temperaturas de banana na variedade terra ( *Musa Sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Paraná, v. 4, n.2, p. 218-234, 2010.

SFREDO, M. A. - **Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas**. 319 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SFREDO, M. A. - **Secagem de café para obtenção de bebidas finas**, 2002. 197 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

SHARMA, G.P.; PRASAD, S. **Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying**, J. Food Eng., 65, 609–617, 2004.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M. C.; ROSSELL, C. **Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit**. Journal of Food Engineering, v. 66, p. 323-328, 2005.

SILVA, B. K; ALVES, E. U; MATOS, P. M; BRUNO, R. L. A, Caracterização morfológica de frutos, sementes e fases da germinação de *Pachira aquatica* Aubl. (Bombacaceae). **SEMINA: CIÊNCIAS AGRÁRIAS**. vol. 33, n. 3, p. 891-898, 2012.

SIMMONDS, M.A.; WARD, G.T. MCEWEN, E. **The drying of wheatgrain – Part I: the mechanism of drying**. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, v.31, n.1, p.265-278, 1953.

STEFFE, J.F.; SINGH, R.P. **Liquid diffusivity of rough rice components**, Trans. ASAE, 23,767–774, 1980.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

TONON, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. **Influência da temperatura do ar de secagem e da concentração de agente carreador sobre as propriedades físico-químicas do suco de açaí em pó**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.29, 444-450, 2009.

TSCHEUSCHNER, H.-D. N. N. Mohsenin: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr. Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York u. a. 1986. Preis: 140.—£. **Food / Nahrung**, v. 31, n. 7, p. 702-702, 1987.

XIONG, X.; NARSIMHAN, G.; OKOS, M.R. **Effect of composition and pore structure on binding energy and effective diffusivity of moisture in porous food**, J. Food Eng., 15, 187–208, 1991.

VIGANÓ, J. **Propriedades termodinâmicas de adsorção de água e cinética de secagem de subprodutos da industrialização de abacaxi (ananás comosus l.) – casca e cilindro central.** Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos. São José do Rio Preto, 2012

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. **Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms.** International Journal of Food Engineering, v. 8, n. 1, p. 1-19, 2012.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. **Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace,** Food Res. Int., 4, 39–46, 2007.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. **Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs.** Drying Technology, New York, v. 14, n. 10, p. 2225 - 2253, 1996.