

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS GRÃOS E FRUTOS
DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM**

WILLIAN DIAS ARAUJO

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2013**

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS GRÃOS E FRUTOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM

WILLIAN DIAS ARAUJO

Orientador PROF. DR. ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central - UFGD

633.368 Araujo, Willian Dias.
A663c Caracterização física dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem / Willian Dias Araujo – Dourados– MS : UFGD, 2013.
96 f.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli.
Dissertação (Mestrado em Agronomia)
Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Amendoim – Produção. 2. Grãos de amendoim.
I. Título.

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS GRÃOS E FRUTOS DE
AMENDOIM DURANTE A SECAGEM**

por

Willian Dias Araujo

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovado em: / /

Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli
Orientador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Paulo Cesar Corrêa
Membro da Banca – UFV/DEA

Prof. Dr. XXXXXXXXXXXX
Membro da Banca – UFGD/FC

Dedico

Primeiramente a Deus, pela saúde e sabedoria concedida.

Aos meus pais, pelo apoio e por não terem medido esforços nessa caminhada.

Ao Prof. André Luís Duarte Goneli pela dedicação e ajuda nas horas de dificuldade.

*“Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte, não temerei mal nenhum, porque tu
estás comigo: a tua vara e o teu cajado me consolam.”*

(Salmo 23.4)

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, por iluminar essa longa caminhada e nos conceder muita saúde e forças para lutar e nunca desistir dos nossos objetivos.

À Universidade Federal da Grande Dourados pela oportunidade dada de tornar-me um profissional na área agrícola.

Ao Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli por orientar-me nos momentos de dificuldade, pela amizade, paciência e confiança ao longo desses anos.

À todos os professores da Faculdade de Ciências Agrárias por transmitir todos os seus conhecimentos, no intuito de tornar-nos não só apenas engenheiros agrônomos, mas sim cidadãos.

Aos meus pais Marly Dias Araujo e Carlos Silva Araujo, aos meus irmãos, pelo amor e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a execução deste trabalho e da minha formação.

A todos a minha gratidão.

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO GERAL.....	01
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	05
CAPÍTULO 1	
CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS E FRUTOS DE AMENDOIM EM CAMADA DELGADA.....	06
1.1 INTRODUÇÃO.....	06
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
1.2.1. Determinação do coeficiente de difusão efetivo.....	13
1.2.2. Influência da temperatura.....	14
1.2.3. Análise estatística.....	15
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
1.3.1. Determinação do coeficiente de difusão efetivo.....	24
1.3.2. Influência da temperatura.....	25
1.4 CONCLUSÕES.....	29
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
CAPÍTULO 2	
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS E GRÃOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM.....	34
2.1 INTRODUÇÃO.....	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.2.1. Massa específica aparente e real.....	37
2.2.2. Porosidade da massa.....	39
2.2.3. Massa de 1000 frutos e grãos.....	39
2.2.4. Forma.....	39
2.2.4.1. Área projetada.....	40
2.2.4.2. Área superficial.....	40
2.2.5. Análise estatística.....	42
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43

2.3.1 Propriedades físicas dos grãos de amendoim.....	43
2.3.2 Propriedades físicas dos frutos de amendoim.....	52
2.4 CONCLUSÕES.....	61
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
CAPÍTULO 3	
CINÉTICA DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS FRUTOS E GRÃOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM.....	65
3.1 INTRODUÇÃO.....	65
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	68
3.2.1. Cinética da contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim.....	70
3.2.2. Efeito da temperatura.....	72
3.2.3. Análise estatística.....	73
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
3.3.1. Contração volumétrica da massa dos grãos e frutos de amendoim.....	75
3.3.2. Contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim.....	80
3.3.3. Cinética da contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim.....	85
3.3.4. Propriedades termodinâmicas durante a contração volumétrica unitária dos grãos e frutos.....	91
3.4 CONCLUSÕES.....	93
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

ARAÚJO, Willian Dias. **Caracterização física dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem**. 2013. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

RESUMO

O amendoim é uma oleaginosa que possui grande potencial produtivo e um alto teor de óleo com qualidade considerável, podendo ser utilizado como alternativa na produção de biodiesel e também na alimentação humana. Na tentativa de manter a qualidade do amendoim após a colheita, a secagem é um processo indispensável, onde se procura reduzir o teor de água do produto para níveis seguros de armazenamento. Nesse sentido objetivou-se com o presente trabalho, avaliar o efeito da temperatura do ar de secagem sobre as características físicas dos grãos e frutos de amendoim, bem como o comportamento da contração volumétrica dos produtos durante a secagem. Para isso, foram utilizados grãos e frutos de amendoim da cultivar IAC 505. Os grãos e frutos de amendoim foram submetidos à secagem em estufa de ventilação forçada com diferentes níveis de temperatura (40, 50, 60 e 70°C). Aos dados experimentais foram ajustados dez modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representação da cinética de secagem em camada delgada. A segunda lei de Fick foi utilizada para obter os coeficientes de difusão efetivo. A energia de ativação para a secagem dos grãos e frutos de amendoim, bem como a entropia, entalpia e energia livre de Gibbs foram obtidas. As propriedades físicas como: massa específica aparente e unitária, porosidade, massa de mil grãos e frutos, esfericidade, circularidade, área projetada e superficial e a relação superfície/volume, também foram estudadas durante o processo de secagem. A contração volumétrica dos frutos e grãos de amendoim foi determinada em função do teor de água e do tempo de secagem, para todas as temperaturas. Baseado nos resultados encontrados, conclui-se que dentre os modelos ajustados aos dados experimentais, o modelo de Page foi o escolhido para representar o fenômeno de secagem em camada delgada dos grãos e frutos de amendoim. O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura, e a sua relação com a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius. As propriedades termodinâmicas entalpia e entropia tiveram seus valores reduzidos com aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto que os valores da energia livre de Gibbs aumentam com o aumento da temperatura. A redução do teor de água influenciou todas as propriedades físicas dos

frutos e grãos de amendoim. Os valores da porosidade dos grãos, e os valores da relação superfície/volume tanto dos frutos como dos grãos de amendoim foram aumentados com a redução do teor de água. As demais propriedades físicas avaliadas para ambos os produtos, sofreram redução de suas magnitudes com a redução do teor de água. Em relação à forma dos produtos estudados, apenas a circularidade dos grãos de amendoim não obteve tendência em seus valores com a redução do teor de água. O teor de água influencia na contração volumétrica da massa e unitária dos frutos e grãos de amendoim, sendo este fenômeno satisfatoriamente descrito pela equação polinomial de segundo grau, exceto para a contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim, onde o modelo linear teve melhor ajuste. O incremento da temperatura do ar de secagem não influenciou na redução volumétrica dos produtos avaliados, mas promoveu redução no tempo de encolhimento dos grãos e frutos de amendoim.

Palavras-chave: 1) *Arachis hypogaea* L., 2) Modelo de Page, 3) Difusividade, 4) Energia de ativação, 5) Contração volumétrica.

ABSTRACT

The peanut is an oilseed crop that has a great productive potential and a high oil content with considerable quality, it can be used as alternative for biodiesel production and also as human food. On the attempt of maintaining quality of peanut after harvest, drying is an indispensable process, which seeks to reduce the moisture content of the product to safe storage levels. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of drying air temperature on the physical properties of peanut kernels and fruits as well as the behavior of shrinkage during drying. Were used peanut kernels and fruits of IAC 505 cultivar. The peanut kernels and fruits were dried in a forced air oven at different temperature levels (40, 50, 60 and 70 ° C). Ten mathematical models usually used to represent the drying process of agricultural products were fitted to the experimental data. The Fick's second law was utilized to obtain the effective diffusion coefficients. Activation energy for the drying process of peanut kernels and fruits, as well entropy, enthalpy and Gibbs free energy were obtained. The physical properties such bulk density, true density, porosity, thousand grain weight, sphericity, circularity, projected area, surface area and surface/volume ratio physical properties were determined during the drying process. The peanut kernel and fruit shrinkage was determined as a function of moisture content and drying time for all air temperatures. Based on the obtained results, it can be concluded that among the model to the experimental data, the Page model was selected to represent the phenomenon of drying thin layer of fruit and peanut kernels. The effective diffusion coefficient increases with increasing temperature and its relationship with the drying temperature can be described by the Arrhenius equation. Thermodynamic properties enthalpy and entropy decreased with the increase in the air drying temperature while Gibbs free energy increased with increasing temperature. The reduction of the moisture content affects all the physical properties of fruits and peanut kernels. The values of the porosity of the peanut kernels, and the values of surface / volume ratio of the fruit as well as peanut kernels were increased by reducing the moisture content. The other physical properties for both products decreased by their magnitudes with reduced moisture content. Regarding the form of the products studied, only the circularity of peanut kernels didn't obtained tendency on it's values by reducing the moisture content. The moisture content influences the bulk shrinkage and peanut kernels and fruits shrinkage, being this

phenomenon satisfactorily described by second-degree polynomial equation, except for the peanut fruits bulk shrinkage, where the linear model had the best fit. Increasing the air drying temperature did not influenced the volumetric reduction of the products evaluated, but decreased the peanut kernels and fruits shrinkage time.

Keywords: 1) *Arachis hypogaea* L., 2) Page Model, 3) Diffusivity, 4) Activation energy, 5) Shrinkage.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é um produto cultivado em todo o Brasil e tem uma grande importância econômica, cujo valor de mercado, interno e externo, rende bons lucros ao produtor e principalmente à indústria alimentícia. Algumas variedades possuem grande quantidade de lipídios, variando seu teor de óleo entre 45 a 50%, sendo frequentemente utilizado na culinária, porque tem um sabor agradável.

Nos anos 70 a produção de amendoim estava quase que totalmente concentrada nos estados de São Paulo e Paraná, responsáveis por 90% da produção nacional e sua distribuição visava atender a demanda do mercado de alimentos destinados ao consumo animal, através do farelo e do óleo vegetal. Foi nessa década que ocorreu a expansão do cultivo da soja, beneficiada por fatores político-econômicos, alterando o perfil da produção e consumo de amendoim no Brasil (FREITAS et al., 2005).

Não só os fatores políticos fizeram com que diminuísse os recursos investidos na cultura do amendoim, outros aspectos contribuíram para o seu declínio, como crescentes custos de produção, baixo produtividade, susceptibilidade às variações climáticas e intensas variações nos preços durante a comercialização. Pequenos e médios produtores continuaram a produzir o amendoim devido ao baixo nível tecnológico exigido. Dificuldades técnicas na produção também serviram como fontes limitantes que corroboraram para o decréscimo da produção, fazendo com que indústrias e produtores concluíssem que se mantido o mesmo sistema de produção precário, a cultura iria desaparecer em pouco tempo. Como soluções, a introdução de equipamentos de colheita e pós-colheita além da substituição das cultivares por outras de ciclo mais longo, para que a colheita não coincidisse com o período mais chuvoso, foram empregadas (FREITAS et al., 2005).

Atualmente, mudanças tecnológicas no cultivo e no beneficiamento dos produtos agrícolas estão trazendo um aumento no volume produzido de grãos e nas características do mercado. Por ser uma leguminosa, o amendoim é muito utilizado no consórcio e na rotação de cultura com gramíneas. O amendoim, assim como a soja entra na rotação de cultura com a cana-de-açúcar favorecendo a manutenção dos atributos físicos e químicos do solo, principalmente em regiões onde há a produção de álcool e

açúcar. Além de ajudar no controle de ervas daninha, a cultura equilibra os nutrientes do solo, como o nitrogênio, essencial para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, nesses casos todo o processo de cultivo e colheita são mecanizados. O seu cultivo também pode ser realizado em pequenas propriedades, onde se visa o uso intensivo da área, característica típica de produção em agricultura familiar.

Conforme o levantamento da safra 2012/2013, feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a área cultivada com amendoim (*Arachis hypogaea* L.) no Brasil é de 99,7 mil hectares. A maior produtividade pode ser observada na região Sudeste, com 5.015 kg/ha⁻¹, enquanto a região Centro Oeste fica com 2.450 kg/ha⁻¹. O amendoim deve atingir uma produção de 286,7 mil toneladas na safra 2012/2013, apresentando um aumento em torno de 2,8% quando comparado à safra anterior (2011/2012). O uso de cultivares de porte rasteiro e mecanização das operações de plantio e colheita são tecnologias que refletiram em uma maior produção. Estas tecnologias são utilizadas principalmente em São Paulo e no cerrado, onde o amendoim é cultivado em rotação ou em segunda safra. Neste contexto, parte da produção é exportada ou destinada à indústria.

No Brasil normalmente são realizadas duas safras de amendoim, sendo a primeira conhecida como safra das águas, representando o maior volume produzido anualmente e a segunda safra (seca), complementa o montante. As cultivares utilizadas são do tipo rasteiro e ereto. Os cultivares de amendoim, como *Runner* IAC 886, possuem crescimento do tipo rasteiro, são mais adaptáveis à mecanização e preferidos pelos mercados importadores, alcançando produtividade média de 4000 kg/há⁻¹, superando em 30% a produtividade dos cultivares de porte ereto. A desvantagem é seu ciclo tardio, levando entre 130 e 145 dias (FREITAS et al., 2005). Suas vagens contêm duas sementes, com rendimentos entre 70 e 80% no descascamento. Os grãos possuem película de cor rosada e alto teor de óleo. Cultivares do tipo ereto apresentam ciclo entre 100 e 120 dias, adequados à safra de verão e safrinha, e também para produtores que não dispõem de mecanização.

O óleo do amendoim pode ser empregado como matéria prima para a produção de biodiesel, uma vez que boa parte de toda a energia consumida no mundo provém de combustíveis de origem fóssil. Essas fontes são limitadas e, portanto, a busca por fontes alternativas de energia é extremamente relevante. Assim, os óleos vegetais aparecem como alternativa para a substituição dos tradicionais combustíveis originados do petróleo (FERRARI et al., 2005). O amendoim também possui outras finalidades

industriais como: tintas, vernizes, óleos lubrificantes, inseticidas, e até mesmo a nitroglicerina pode ser feita a partir do óleo de amendoim. O farelo de proteína, resíduo do processamento do óleo, é usado na alimentação animal e como fertilizante do solo. As cascas de amendoim são utilizadas, tanto no Brasil como em outros países como cama de frango, cama para gado leiteiro confinado, como fonte de fibras para ruminantes e sua farinha é utilizada como fonte de fibras de baixa caloria em vários produtos alimentícios para o homem, desde que a presença de aflatoxinas seja controlada (LIEN et al., 1998), desse forma reforça-se ainda mais o conceito de que o produto deva ser desidratado

O amendoim normalmente começa a ser colhido quando a maioria das suas vagens atinge a fase de maturação fisiológica completa. A colheita com grande quantidade de vagens imatura afeta a qualidade do produto, interferindo no seu correto armazenamento. Outro aspecto negativo é o atraso na colheita resultando na perda de vagens por desprendimento no solo, possibilitando maior susceptibilidade ao ataque de fungos e pragas e ocorrência de grãos germinados.

A secagem é um processo comercial bastante utilizado para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas. Consiste na remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, para que permita longos períodos de armazenamento, sem que ocorram perdas significativas durante o processo (MARTINAZZO, 2010).

A redução do teor de água através da secagem é um complicado processo simultâneo de transferência de calor e massa, envolvendo o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no grão por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (YILBAS et al., 2003). Durante o processo de secagem o calor evapora a água do alimento e o ar remove o vapor d'água, reduzindo a umidade e a atividade de água e aumentando a vida útil do produto final (FIOREZE, 2004). O processo de secagem necessita de gradientes que sirvam de força motriz para ocorrer fluxo de massa de água para o ar de secagem. O aumento da temperatura do ar de secagem provoca diferenças entre a pressão parcial de vapor de água no produto e a pressão parcial de vapor de água do ar secante, e esse fenômeno favorece a redução do excesso de água do material, além demandar gasto de energia térmica para a evaporação da água e esta, ao evaporar, esfria o ar de secagem pela perda de calor sensível e o ar o recupera na forma de vapor de água (calor latente).

O conhecimento sobre os principais fatores que afetam a qualidade dos produtos agrícola armazenados, como a temperatura, a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação, tornam-se necessário para a correta operação de secagem e armazenagem. Outro fator importante, é que o amendoim deva ser preferencialmente, armazenado seco e, principalmente, em locais com baixas temperaturas. Caso contrário, o desenvolvimento de fungos e bactérias pode causar contaminações por micotoxinas que prejudicam e depreciam a qualidade do produto e subproduto, dificultando sua comercialização.

Para consolidação do sucesso econômico e justificar o investimento na cultura do amendoim, é de fundamental importância o conhecimento das propriedades físicas deste produto agrícola, facilitando o dimensionamento e operacionalidade de máquinas e equipamentos nas principais operações pós-colheita, no intuito de proporcionar uma correta conservação. A fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e melhoria da qualidade do produto processado, a determinação e o conhecimento do comportamento das propriedades físicas são indispensáveis para o adequado desenvolvimento de processos e simulações, que visem aperfeiçoar o sistema produtivo da cultura do amendoim.

O conhecimento das relações entre as propriedades físicas e os fatores de deterioração pode auxiliar na solução de problemas relacionados à transferência de calor e massa, durante as etapas de secagem e aeração, e para um armazenamento correto do produto. Juntamente com o teor de água, a massa específica, a porosidade e o volume são parâmetros utilizados para determinar as condições de secagem e armazenagem de produtos agrícolas e, conseqüentemente, possibilitam a predição de perdas de qualidade do material até o momento de sua comercialização. Estas informações são importantes, uma vez que, em condições adequadas de armazenagem, o produtor pode obter lucros maiores, devido à escassez desses produtos.

Apesar de existir um aumento na produção do amendoim a nível nacional, ainda são insuficientes as informações que possam trazer avanços tecnológicos para esta cultura, principalmente do que diz respeito aos fatores de pós-colheita. De um modo geral, o objetivo do presente estudo foi realizar modelagens matemáticas, avaliar as principais propriedades físicas, bem como a cinética da contração volumétrica dos frutos e grãos de amendoim durante o processo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONAB. (2012). **Acompanhamento da Safra 2012/2013**: terceiro levantamento – Dezembro/2012. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 01/01/2013.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-químicas e consumo em geradores de energia. **Química Nova**, v. 18, n. 01, p. 19-23, jan. 2005.

FIOREZE, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. João Pessoa: **Editora UFPB**, p. 229, 2004.

FREITAS, S. M.; MARTINS, S. S.; NOMI, A. K.; CAMPOS, A. F. Evolução do Mercado brasileiro de amendoim. In: SANTOS, R. C. **O agronegócio do amendoim no Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão, p. 17 – 44, 2005.

LIEN, R. J.; HESS, J. B.; CONNER, D. E.; WOOD, C. W.; SHELBY, R. A. Peanut hulls as a litter source for broiler breeder replacement pullets. **Poultry Science**, Champaign, v. 77, p. 41-46, 1998.

MARTINAZZO A.P.; MELO E.C.; CORRÊA P.C.; SANTOS R.H.S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim limão *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

YILBAS, B.S.; HUSSAIN, M.M.; DINCER, I. Heat and moisture diffusion in slab products to convective boundary condition. **Heat and Mass Transfer**, v.39, p.471–476, 2003.

CAPÍTULO 1

CINÉTICA DE SECAGEM DOS GRÃOS E FRUTOS DE AMENDOIM EM CAMADA DELGADA

1.1. INTRODUÇÃO

Assim como a maioria dos produtos agrícolas, o amendoim é normalmente colhido com teor de água inadequado para uma correta e eficiente conservação. Com isso, a redução da quantidade de água do material deve ser conduzida com a finalidade de se reduzir a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem no produto durante o armazenamento.

A secagem é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos produtos agrícolas, porque reduz a quantidade de água livre, responsável pelas principais atividades metabólicas e desenvolvimento de microrganismos nos produtos agrícolas, proporcionando períodos maiores de conservação dos alimentos (ANDRADE et al., 2003). Resende et al. (2010), também apontam a secagem como um importante processo na conservação dos produtos agrícolas, baseando-se no fato que, microrganismos, enzimas e todos os mecanismos metabólicos dependem do teor de água para realizar suas atividades.

A secagem dos produtos agrícolas consiste em um complexo processo que envolve a transferência de calor e massa, onde o excesso de água é retirado do produto através da diferença de pressão parcial de vapor existente entre o ar de secagem e o material a ser seco, assim, o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no produto, provocando a redução do teor de água. De acordo com Resende et al. (2009), a secagem pode causar alterações significativas na qualidade e nas propriedades físicas dos produtos, dependendo das condições e métodos empregados. Martinazzo et al. (2010) admitem que a remoção de grande parte de água inicialmente contida no produto logo após a maturidade fisiológica, permite longos períodos de armazenamento, sem que ocorram perdas significativas durante o processo. O entendimento mais minucioso deste processo pode gerar informações que possibilitam maior economia e eficácia nas técnicas de secagem.

Nos últimos anos, a condução de experimentos de secagem de produtos agrícolas, tem fornecido informações sobre diferentes fatores que influenciam na

determinação das condições desse processo. O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos através de simulações matemáticas, e estas simulações são fundamentadas na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto (BERBERT et al., 1995), onde modelos matemáticos são utilizados no intuito de representar a redução de água do material.

Defini-se como camada delgada, a secagem de apenas uma única camada do produto a ser estudado. Informações geradas durante a secagem em camada delgada, quando associada a outras informações que permitam representar propriedades físicas particulares do produto em estudo, podem fornecer um conjunto de dados matemáticos capazes de auxiliar nos cálculos e na compreensão dos processos em camada espessa. De acordo com Kashaninejad et al. (2007), uma camada espessa é constituída por um conjunto de camadas delgadas. Atualmente a literatura especializada apresenta diferentes modelos matemáticos capazes de descrever a secagem em produtos higroscópicos. Quando utilizados, estes modelos possuem a habilidade de representar satisfatoriamente o fenômeno de secagem ao longo do tempo, através da sua curva de secagem. Midilli et al. (2002) entendem que na secagem em camada delgada, um teor de água do produto é correlacionado com parâmetros de secagem, após terem sido condicionados à temperaturas e umidades relativas constantes.

A maioria dos estudos relacionados à secagem em camada delgada de produtos agrícolas tem apresentado três diferentes modelos de secagem, sendo eles, teóricos, semi-teóricos e os empíricos. Os métodos teóricos normalmente consideram as condições externas sob as quais a operação ocorre como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos.

Modelos semi-teóricos vem sendo utilizados por diferentes pesquisadores, em trabalhos de modelagem matemática dos mais diversos produtos agrícolas, e estes modelos, normalmente, são derivações da segunda lei de Fick ou de modificações de modelos simplificados, embora ofereça facilidades em sua aplicação, sua validade se restringe apenas nas faixas de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e teor de água (PANCHARIYA et al., 2002; OZDEMIR e DEVRES, 1999). Estes modelos também possuem a capacidade de avaliar os mecanismos de transporte de massa durante o processo de secagem, além de terem grande importância no desenvolvimento de equipamentos pós-colheita, favorecendo a redução dos custos operacionais (DIONELLO et al., 2009)

Embora os modelos empíricos possam descrever as curvas de secagem para determinadas condições experimentais, estes modelos acabam negligenciando os principais fundamentos do processo de secagem em materiais vegetais e seus parâmetros não oferecem qualquer significado físico (KEEY, 1972), não fornecendo indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de massa no interior dos produtos. Mohapatra e Rao (2005), relatam que os modelos empíricos tradicionais são utilizados nos estudos de secagem em camada delgada dos mais diversos produtos agrícolas.

Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, onde seu fundamento diz que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. A água pode movimentar-se no interior dos produtos vegetais por mecanismos e caminhos distintos. Como a maioria dos produtos agrícolas apresentam capilares porosos e os mecanismos de transporte da água no seu interior podem ser realizados através da difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (Martinazzo et al., 2007). Segundo Goneli et al. (2007), a teoria da difusão líquida assume que a capilaridade não exerce qualquer influência no processo, além de desconsiderar os efeitos da troca de energia e massa entre um corpo e outro, o que pode induzir a erros experimentais, considerando que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar de maneira imediata.

Devido à complexidade de se definir por qual mecanismo de difusão ocorre o transporte de água no seu interior dos produtos agrícolas, por meio de convenção, determinou-se que o coeficiente de difusão seja considerado efetivo (ROCA et al., 2008). Recentemente têm sido realizados inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem como: polpa de cupuaçu (PEREZ et al., 2013), sementes de crambe (FARIA et al., 2012), sementes de mamão (VENTURINI et al., 2012), grãos de milho (OLIVEIRA et al., 2012), arroz em casca (MENEGHETTI et al., 2012), polpa do figo-da-india (MADUREIRA et al., 2011), polpa de oiti (SOUSA, et al., 2011), nabo forrageiro (SOUSA et al., 2011) e café (RESENDE et al., 2010).

Além das informações fornecidas através do modelo da difusão, outro conhecimento muito importante está relacionado com as propriedades termodinâmicas dos produtos agrícolas durante o processo de secagem. Estas propriedades são capazes

de gerar informações, as quais podem servir de embasamento no desenvolvimento de projetos e equipamentos de secagem, nos cálculos de energia requerida para o desencadeamento do processo, para caracterizar o comportamento da água adsorvida, para avaliar detalhadamente as pequenas estruturas dos alimentos e para estudar os fenômenos físicos ocorridos na superfície dos materiais.

As propriedades termodinâmicas podem ser usadas para estimar a mínima quantidade de energia requerida na secagem. De acordo com Kaya e Kahyaoglu (2006), as propriedades termodinâmicas são calculadas através de isotermas de sorção, onde se podem quantificar os valores de entalpia e entropia, que são fundamentais na análise da exigência energética e previsão dos parâmetros cinéticos nos processos de secagem.

Mudanças de entalpia fornecem uma medida da variação de energia ocorrida na interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante os processos de sorção. A entropia pode estar associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema e está associada com o arranjo espacial da relação água-produto. Assim, entropia caracteriza, ou define, o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto (McMinn et al., 2005).

A energia livre de Gibbs pode indicar o quanto à água esta ligada ao produto além de fornecer um critério de avaliação sobre a remoção desse fluido. A espontaneidade do processo de secagem está diretamente relacionada com os valores de energia livre de Gibbs, ou seja, se os valores forem negativos o processo é caracterizado como espontâneo, mas se os valores forem positivos o processo torna-se não-espontâneo (TELIS et al., 2000). De acordo com Nayak e Pandey (2000), a energia livre de Gibbs entra em equilíbrio quando suas magnitudes forem zero. Durante a secagem a energia livre de Gibbs é definida como a energia requerida para que as moléculas de água na forma de vapor sejam transferidas para uma superfície sólida ou vice-versa. Essa energia é considerada como uma medida do trabalho feito pelo sistema para realizar o processo de desorção ou o de adsorção.

Diante da limitação de informações a respeito do pré-processamento do amendoim, objetivou-se com o presente trabalho estudar a cinética de secagem tanto dos grãos como dos frutos de amendoim, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados observados, além de obter o coeficiente de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas durante a secagem dos produtos.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados, MS.

Foram utilizados frutos e grãos de amendoim da cultivar IAC 505, do grupo vegetativo e comercial Runner, o qual foi cultivado na Fazenda Experimental da UFGD. Com o objetivo de garantir a qualidade dos produtos, todos os tratamentos culturais recorrentes a cultura do amendoim foram realizados, como o controle de pragas, doenças e plantas invasoras.

Os frutos de amendoim foram colhidos manualmente, para evitar qualquer tipo de influência no produto, com posterior seleção dos frutos, onde procurou-se retirar todos aqueles defeituosos, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa. Posteriormente os grãos foram debulhados manualmente dos frutos, seguindo o mesmo critério de seleção anteriormente aplicado.

Após a colheita, os frutos apresentaram teores de água próximos a 0,56 decimal b.s., e os grãos apresentaram um teor de água de aproximadamente 0,59 decimal b.s. Os teores de água dos produtos foram determinados pelo método gravimétrico em estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24h, em duas repetições (Brasil, 2009).

A secagem dos produtos em camada delgada foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), e respectivas umidades relativas (19, 12, 7 e 6%). Foram colocadas no interior do equipamento, para cada tratamento, duas bandejas metálicas com diâmetro de 30 cm, contendo fundo telado para permitir a passagem do ar através da camada delgada do produto. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas com o auxílio de três psicrômetros instalados no ambiente onde a estufa se encontrava.

A redução do teor de água dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem foi acompanhada com o uso de uma balança com resolução de 0,01g pelo método gravimétrico. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, onde o espaçamento entre as leituras foi controlado pela diferença de massa entre uma leitura e outra (conhecendo-se o teor de água inicial), evitando diferenças elevadas de teor de água entre as leituras. O teor de água

considerado como ponto final da secagem, para fins de modelagem matemática, foi de, aproximadamente, 0,04 decimal b.s. para os frutos e grãos de amendoim.

A razão de umidade dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem nas diferentes condições de ar foi determinada por meio da seguinte expressão:

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} \quad (1)$$

em que:

RU : razão de umidade do produto, adimensional;

U^* : teor de água do produto, decimal b.s.;

U_e^* : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.; e

U_i^* : teor de água inicial do produto, decimal b.s.

Os dados do teor de água de equilíbrio, necessários para a determinação da razão de umidade nas condições de temperatura e umidade relativa do ar avaliada no presente estudo, foram obtidos a partir do trabalho desenvolvido por Corrêa et al., (2007a), conforme mostrado a seguir para os grãos (Equação 2) e frutos (Equação 3).

$$U_e^* = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-0,0003(T + 85,5418)} \right]^{\left(\frac{1}{1,7518} \right)} \quad (2)$$

$$U_e^* = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-0,0005(T + 51,6248)} \right]^{\left(\frac{1}{1,5244} \right)} \quad (3)$$

em que:

UR : umidade relativa, decimal;

T : temperatura do ambiente, °C; e

U_e : umidade de equilíbrio, decimal b.s.

A razão de umidade é essencial para descrever diferentes modelos de secagem em camada delgada. A cada tempo de secagem, um teor de água é correlacionado com o teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio, para condições específicas de secagem. Desta forma, em todas as condições testadas, os modelos

tradicionalmente utilizados para descrever a cinética de secagem em camada delgada de produtos agrícolas, foram ajustados aos valores de razão de umidade em função do tempo de secagem, procedimento este também realizado por diversos pesquisadores, (OLIVEIRA et al., 2012; SOUSA et al., 2011; CORRÊA et al., 2007b; MOHAPATRA e RAO, 2005; ERTEKIN e YALDIZ, 2004; LAHSASNI et al., 2004; AKPINAR et al., 2003). No Quadro 1, apresentam-se os modelos avaliados neste trabalho.

QUADRO 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas em camada delgada.

Designação do modelo	Modelos	
Aproximação da Difusão	$RU = a \exp(-k\theta) + (1 - a) \exp(-kb\theta)$	(4)
Dois Termos	$RU = a \exp(-k_0\theta) + b \exp(-k_1\theta)$	(5)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k\theta) + (1 - a) \exp(-ka\theta)$	(6)
Henderson e Pabis Modificado	$RU = a \exp(-k\theta) + b \exp(-k_0\theta) + c \exp(-k_1\theta)$	(7)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k\theta) + c$	(8)
Midilli	$RU = a \exp(-k\theta^n) + b\theta$	(9)
Page	$RU = \exp(-k\theta^n)$	(10)
Thompson	$RU = \exp\left(\left(-a - (a^2 + 4b\theta)^{0,5}\right) / 2b\right)$	(11)
Verna	$RU = a \exp(-k\theta) + (1 - a) \exp(-k_1\theta)$	(12)
Wang e Sing	$RU = 1 + a\theta + b\theta^2$	(13)

em que:

- k, k₀, k₁: constantes de secagem, s⁻¹;
- a, b, c, n: coeficientes dos modelos; e
- θ: tempo de secagem, h.

1.2.1. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo dos grãos e frutos de amendoim, para as diferentes condições de secagem (40, 50, 60 e 70°C), foi calculado utilizando a Equação 14, baseado na teoria da difusão líquida. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como esférica e com aproximação de oito termos.

O modelo de difusão efetivo para a forma geométrica esférica, considerando o raio equivalente dos grãos como 6,14 mm e dos frutos 8,97 mm, foi obtido por regressão não linear, a partir da seguinte equação:

$$RU = \frac{U_i^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \cdot \pi^2 \cdot D_i \cdot \theta}{9} \cdot \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (14)$$

em que:

D_i : coeficiente de difusão, $m^2 s^{-1}$;

R_e : distância radial até a superfície, m; e

n_t : número de termos;

Para o cálculo do raio equivalente utilizado no modelo de difusão efetivo (Equação 14), fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos e frutos de amendoim, quais sejam: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, 60 grãos e 60 frutos foram escolhidos aleatoriamente e medidos. O volume de cada grão e fruto foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, segundo a Equação 15, descrita por Mohsenin (1986), como:

$$V = \pi \left(\frac{a \cdot b \cdot c}{6} \right) \quad (15)$$

em que:

V : volume, mm³;

a : comprimento, mm;

b : largura, mm; e

c : espessura, mm.

1.2.2. Influência da temperatura

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (16)$$

em que:

D_o: fator pré-exponencial;

E_a: energia de ativação, kJ mol⁻¹;

R: constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹; e

T_a: temperatura absoluta, K.

As propriedades termodinâmicas entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, relacionadas ao processo de secagem dos grãos e frutos de amendoim, foram determinadas através do método descrito por Jideani e Mpotokwana (2009), de acordo com as seguintes equações:

$$\Delta h = E_a - RT \quad (17)$$

$$\Delta s = R \left(\ln D_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (18)$$

$$\Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (19)$$

em que:

Δh : entalpia específica, J mol^{-1} ;

Δs : entropia específica, $\text{J mol}^{-1}\text{k}^{-1}$;

ΔG : energia livre de Gibbs, J mol^{-1} ;

k_B : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{Jk}^{-1}$; e

h_P : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{Js}^{-1}$.

1.2.3 - Análise estatística

Os dados experimentais de razão de umidade durante a secagem dos grãos e frutos de amendoim foram submetidos à análise de regressão não linear e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Para determinar o grau de ajuste para cada temperatura de secagem considerou-se as maiores magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), valores reduzidos do erro médio relativo (P), e do desvio padrão da estimativa (SE), além da tendência de distribuição dos resíduos (aleatório ou tendencioso), isso para todas as condições do ar de secagem. E para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, utilizou-se o programa computacional STATISTICA 7.0[®].

O erro médio relativo (P) e o desvio-padrão da estimativa (SE) para cada um dos modelos foram calculados através das Equações 20 e 21, respectivamente.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (20)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (21)$$

em que:

n : número de observações experimentais;

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo; e

GLR : graus de liberdade do modelo.

Para o cálculo do coeficiente de difusão efetivo (Equação 14), os dados experimentais de razão de umidade durante a secagem dos grãos e frutos de amendoim foram submetidos à análise de regressão não linear, utilizando-se as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio padrão da estimativa (SE) para avaliar o grau de ajuste para cada temperatura de secagem utilizada.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos Quadros 2 e 3, respectivamente, encontram-se as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e o coeficiente de determinação (R^2) e as tendências de distribuição de resíduos utilizados para a comparação entre os dez modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade devido a secagem dos grãos e frutos de amendoim em diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

De acordo com os Quadros 2 e 3, pode-se observar que, à exceção do modelo de Wang e Sing, todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação superiores a 99%. Segundo Kashaninejad et al. (2007), valores do coeficientes de determinação superiores a 98%, indicam representação satisfatória dos modelos para o fenômeno de secagem. Mohapatra e Rao (2005) relatam que a utilização do coeficiente de determinação como o único critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem, não constitui um bom parâmetro para representação do fenômeno de secagem, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos.

Analisando o Quadro 2, constata-se que, dentre os dez modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem dos grãos de amendoim, apenas os modelos Exponencial de Dois Termos, Logarítmico e Wang e Sing apresentaram magnitudes do erro médio relativo superiores a 10%. Em relação ao Quadro 3, os modelos que apresentaram valores acima de 10% do erro médio relativo foram os modelos Exponencial de Dois Termos e Wang e Sing. Segundo Kashaninejad et al. (2007) os valores do erro médio relativo indicam desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo, enquanto Mohapatra e Rao (2005) consideram modelos com valores de erro médio relativo superiores a 10% inadequados para a descrição de um determinado fenômeno.

Além dos valores do coeficiente de determinação e do erro médio relativo, também foram calculados os valores do desvio padrão da estimativa. Este parâmetro estatístico indica a capacidade de um modelo em descrever com fidelidade um determinado processo físico, sendo que quanto menor for sua magnitude melhor será a qualidade de ajuste do modelo em relação aos dados observados (DRAPER e SMITH, 1998). Assim, analisando os Quadros 2 e 3, nota-se que os modelos Aproximação da difusão, Dois Termos, Henderson e Pabis Modificado, Midilli e Page se destacam

dentre os demais, por apresentarem os menores valores para todas as condições do ar de secagem.

Verifica-se também no Quadro 2 que os modelos Aproximação da difusão, Dois termos, Exponencial de dois termos, Midilli, Page e Thompson apresentaram para todas condições do ar de secagem uma distribuição aleatória dos resíduos, enquanto que no Quadro 3, apenas os modelos Henderson e Pabis Modificado e Wang e Sing não apresentaram distribuição aleatória dos resíduos em todas as temperaturas do ar de secagem. Segundo GONELI et al. (2011), se as distribuições dos resíduos formam figuras geométricas ou tendem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada como tendenciosa e o modelo inadequado para representar o fenômeno em questão.

QUADRO 2. Parâmetros estatísticos e a tendências de distribuição de resíduos obtidos para os modelos utilizados na secagem dos grãos de amendoim.

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(4)	0,0103	2,3958	0,9989	A	0,0045	1,1493	0,9997	A
(5)	0,0090	1,7799	0,9992	A	0,0046	1,1682	0,9997	A
(6)	0,0201	13,3112	0,9958	A	0,0184	10,4244	0,9957	A
(7)	0,0094	2,4386	0,9999	A	0,0049	1,1593	0,9997	A
(8)	0,0253	18,0360	0,9937	T	0,0236	11,5995	0,9933	T
(9)	0,0180	7,2147	0,9970	A	0,0103	2,8820	0,9988	A
(10)	0,0207	8,3947	0,9956	A	0,0110	3,1009	0,9984	A
(11)	0,0125	3,3914	0,9983	A	0,0069	3,5492	0,9993	A
(12)	0,0103	2,3954	0,9989	T	0,0045	1,1493	0,9997	T
(13)	0,1322	84,1190	0,8212	T	0,1100	51,7440	0,8482	T
Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(4)	0,0026	1,1628	0,9999	A	0,0060	4,1218	0,9995	A
(5)	0,0027	1,1595	0,9999	A	0,0063	4,1409	0,9995	A
(6)	0,0118	6,8447	0,9983	A	0,0110	7,7247	0,9985	A
(7)	0,0026	0,6604	0,9999	A	0,0051	1,5238	0,9997	T
(8)	0,0200	9,3297	0,9954	T	0,0205	9,2235	0,9953	T
(9)	0,0059	1,5980	0,9996	A	0,0068	1,5817	0,9995	A
(10)	0,0060	1,5964	0,9995	A	0,0064	2,3327	0,9995	A
(11)	0,0063	3,7976	0,9995	A	0,0093	4,7159	0,9989	A
(12)	0,0026	1,1628	0,9999	A	0,0060	4,1218	0,9995	A
(13)	0,0949	45,2288	0,8909	T	0,0979	55,9638	0,8865	T

A= Aleatório e T= Tendencioso

QUADRO 3. Parâmetros estatísticos e a tendências de distribuição de resíduos obtidos para os modelos utilizados na secagem dos frutos de amendoim.

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(4)	0,0097	4,7781	0,9990	A	0,0096	5,2208	0,9990	A
(5)	0,0090	3,1555	0,9992	A	0,0095	4,3364	0,9990	A
(6)	0,0107	6,9138	0,9988	A	0,0098	5,8173	0,9989	A
(7)	0,0044	1,5834	0,9998	A	0,0045	1,2320	0,9998	A
(8)	0,0148	6,2313	0,9978	A	0,0142	4,4770	0,9978	A
(9)	0,0056	2,0884	0,9997	A	0,0059	1,4517	0,9996	A
(10)	0,0077	4,5836	0,9994	A	0,0069	3,5984	0,9994	A
(11)	0,0085	1,8645	0,9992	A	0,0100	2,4476	0,9988	A
(12)	0,0097	4,7785	0,9990	A	0,0096	5,2202	0,9990	A
(13)	0,0994	46,5921	0,9012	T	0,0924	43,1480	0,9037	T

Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(4)	0,0055	1,0148	0,9996	A	0,0040	0,8521	0,9998	A
(5)	0,0051	0,9378	0,9997	A	0,0036	0,7290	0,9998	A
(6)	0,0072	3,6617	0,9994	A	0,0166	10,5622	0,9967	A
(7)	0,0042	1,2315	0,9998	A	0,0021	0,5806	0,9999	T
(8)	0,0069	2,6045	0,9995	A	0,0100	4,8055	0,9989	A
(9)	0,0047	1,8601	0,9997	A	0,0062	3,1355	0,9995	A
(10)	0,0095	5,0605	0,9990	A	0,0153	8,4298	0,9972	A
(11)	0,0058	2,3687	0,9996	A	0,0080	4,2958	0,9992	A
(12)	0,0055	1,0149	0,9996	A	0,0040	0,8521	0,9998	A
(13)	0,0701	31,611	0,9459	T	0,0966	43,7343	0,8911	T

A= Aleatório e T= Tendencioso

Levando em consideração todos os parâmetros estatísticos pré-estabelecidos além da distribuição dos resíduos, apenas os modelos Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis Modificado, Logarítmico, Verna e Wang e Sing, dentre os dez modelos testados, não puderam ser recomendados para representação da cinética de secagem dos grãos de amendoim em camada delgada (Quadro 2), enquanto no Quadro 3, os modelos Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis Modificado e Wang e Sing também não representam satisfatoriamente a cinética de secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. Assim, todos os demais modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais podem ser recomendados e utilizados para a representação do fenômeno de cinética de secagem dos grãos e frutos de amendoim em camada delgada.

Dentre os modelos recomendados para representação da cinética de secagem em camada delgada dos grãos e frutos de amendoim, o tradicional modelo de Page é o

matematicamente mais simples, com reduzido número de parâmetros, simplificando assim sua aplicação em simulações de secagem. Dessa forma, este modelo foi selecionado para representar a cinética de secagem dos grãos e frutos de amendoim, assim como diversos outros pesquisadores também o recomendou: polpa cupuaçu (PEREZ et al., 2013), sementes de mamão (VENTURINI et al., 2012), polpa de oiti (SOUSA et al., 2011), figo-da-india (MADUREIRA et al., 2011), e café (RESENDE et al., 2010).

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas, para todas as condições do ar secagem, comparações entre os valores observados e os estimados, pelo modelo de Page, da razão de umidade dos grãos e frutos do amendoim, respectivamente, durante a secagem em camada delgada. Analisando o comportamento dos dados nestes gráficos, é possível reforçar a aplicabilidade do modelo de Page, devido à correspondência entre valores estimados e observados.

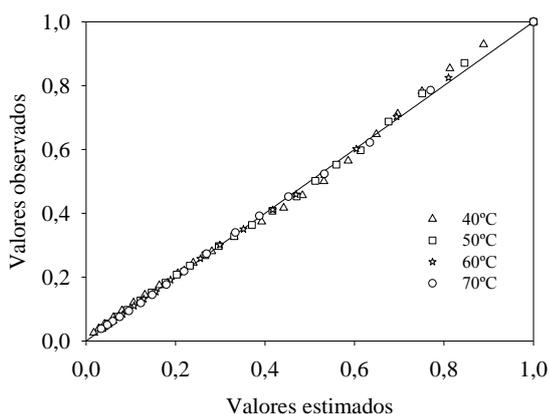


FIGURA 1. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de amendoim em camada delgada.

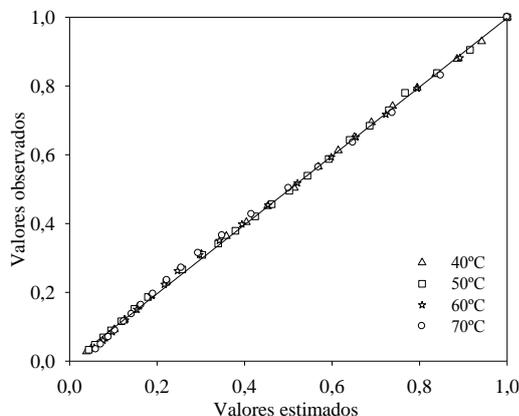


FIGURA 2. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos frutos do amendoim em camada delgada.

Nas Figuras 3 e 4, são apresentadas, respectivamente, as curvas de secagem em camada delgada dos grãos e frutos de amendoim, representadas pelo modelo de Page. Nestas figuras, a secagem está representada pelos valores experimentais e estimados da razão de umidade em função do tempo, para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70°C. O bom ajuste do modelo de Page fica evidenciado pela proximidade dos valores experimentais em relação à curva estimada pelo modelo em todas as condições estudadas.

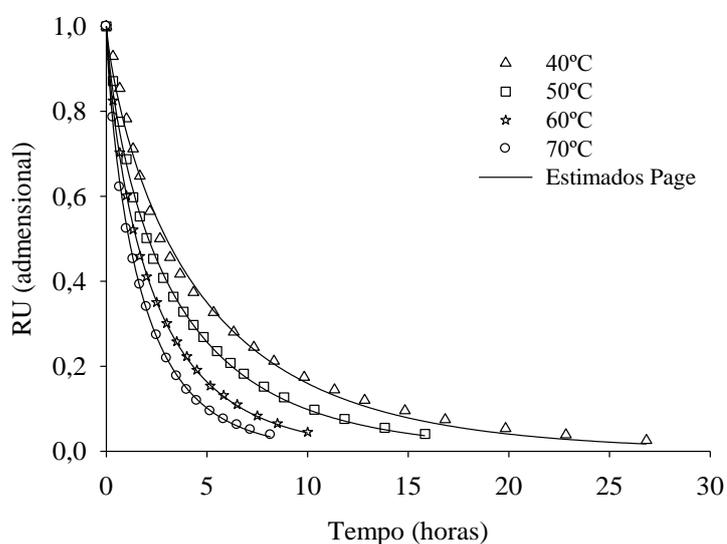


FIGURA 3. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de amendoim em camada delgada.

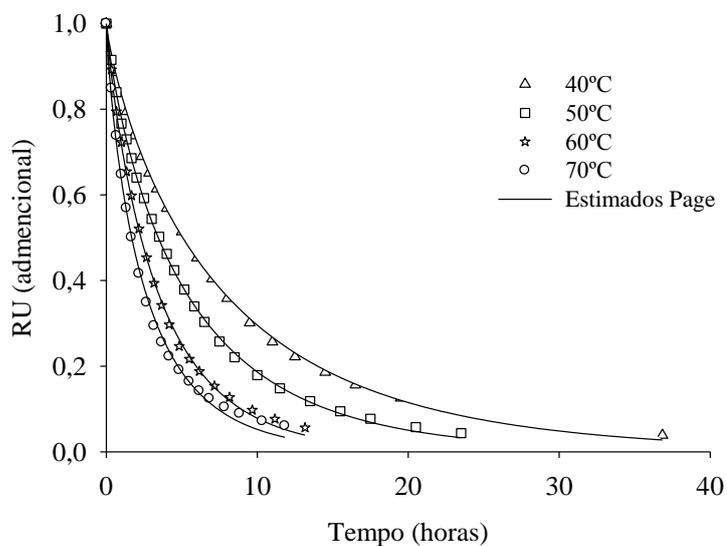


FIGURA 4. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos frutos do amendoim em camada delgada.

Nas Figuras 3 e 4, verifica-se que o processo de secagem ocorre predominantemente em período de secagem a taxa decrescente, provavelmente relacionado com a maior resistência a transferências de água no interior do produto, tornando a taxa de evaporação superficial superior à taxa de reposição de água na superfície do produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

Observando as Figuras 3 e 4, nota-se que a curva característica do modelo de Page apresentou um bom ajuste junto aos valores observados, isso tanto para os grãos como para os frutos de amendoim em todas as temperaturas do ar de secagem. Ainda nestas figuras, também é possível observar a influência da temperatura sobre as curvas de secagem, onde o aumento da temperatura do ar ocasionou uma maior taxa de remoção de água dos produtos, fenômeno esse também observado por diversos pesquisadores em outros produtos agrícolas (PEREZ et al., 2013; VENTURINI et al., 2012; SOUSA et al., 2011; MADUREIRA et al., 2011; MARTINAZZO et al., 2010; RESENDE et al., 2010; ULMANN et al., 2010).

De acordo com as Figuras 3 e 4, observa-se que os grãos, quando comparados aos frutos, necessitaram de um tempo relativamente menor para atingir o ponto final de secagem, em todos os níveis de temperatura. Provavelmente este fenômeno esteja associado à composição física e/ou química dos produtos, uma vez que, os frutos são compostos por grãos e cascas, além dos espaços vazios entre ambos. Dessa forma, a barreira física imposta pela casca no fruto, pode colaborar para as diferenças entre os períodos observados nas Figuras 3 e 4. Os grãos de amendoim necessitaram de 26,8; 15,8; 10,0 e 7,2 horas, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente, para que atingissem o teor de água de aproximadamente, 0,04 decimal b.s. Enquanto nos frutos, o período necessário foi de 36,8; 23,5; 13,1 e 11,8 horas, nas mesmas condições.

No Quadro 4 são apresentados, os coeficientes do modelo de Page (Equação 10) ajustados aos dados observados durante a secagem em camada delgada dos grãos e frutos de amendoim, para as diferentes temperaturas do ar de secagem utilizadas.

De acordo com o Quadros 4, pode-se observar que somente o parâmetro (k) do modelo de Page apresenta variação em sua magnitude com a variação da temperatura do ar de secagem. A constante de secagem (k), que representa as condições externas de

secagem, pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente e à difusão líquida que controla o processo (BABALIS e BELESSIOTIS, 2004).

QUADRO 4. Parâmetros do modelo de Page para diferentes temperaturas do ar de secagem dos grãos e frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	k		n	
	Grãos	Frutos	Grãos	Frutos
40	0,2867	0,1809	0,8060	0,8280
50	0,3914	0,2481	0,7726	0,8303
60	0,5041	0,3325	0,7948	0,8838
70	0,6299	0,4538	0,8006	0,8128

Com a elevação da temperatura, houve aumento nos valores encontrados para os parâmetros (k), e esses valores indicam que a taxa de secagem se eleva com o aumento da temperatura do ar. Para o parâmetro (n) do modelo de Page, que reflete a resistência interna do produto à secagem, não houve nenhuma tendência observada em seus valores em função do incremento da temperatura, tanto para os grãos assim como para os frutos de amendoim (Quadro 4).

A relação do parâmetro (k) do modelo de Page em função da temperatura do ar de secagem dos grãos e frutos de amendoim pode ser descrita, respectivamente, pelas equações lineares a seguir:

$$k = 0,0114 T - 0,1752 \quad (R^2 = 0,9983) \quad (22)$$

$$k = 0,009T - 0,1928 \quad (R^2 = 0,9819) \quad (23)$$

Podemos observar nas Equações 22 e 23, elevadas magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), referentes às equações utilizadas para descrever os valores do parâmetro (k) do modelo de Page em função da temperatura do ar. Utilizando estas equações, juntamente com a média dos valores do parâmetro (n), para todas as condições do ar de secagem, pode-se estimar o teor de água dos grãos e frutos de amendoim, respectivamente, por meio das seguintes expressões:

$$RU = \exp \left[-(0,0114 T - 0,1752) \theta^{0,7936} \right] \quad (24)$$

$$RU = \exp\left[-(0,009 T - 0,1928) \theta^{0,8388}\right] \quad (25)$$

em que:

T: temperatura em °C; e

θ : tempo em horas

1.3.1. Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Nos Quadros 5 e 6, são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos e frutos de amendoim, respectivamente, para diferentes condições de temperatura do ar (40, 50, 60 e 70°C).

QUADRO 5. Coeficientes de difusão efetivo ajustados às diferentes temperaturas de secagem em camada fina dos grãos de amendoim.

Temperatura (°C)	$D \times 10^{-10} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	SE (adimensional)	R^2 (%)
40	1,1831	0,0549	0,9677
50	1,6988	0,0413	0,9775
60	2,4724	0,0420	0,9773
70	3,3502	0,0061	0,9805

QUADRO 6. Coeficientes de difusão efetivo ajustados às diferentes temperaturas de secagem em camada fina dos frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	$D \times 10^{-10} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$	SE (adimensional)	R^2 (%)
40	1,4760	0,0689	0,9655
50	2,2108	0,0643	0,9661
60	3,5081	0,0804	0,9540
70	4,7062	0,0633	0,9698

Podemos observar nos Quadros 5 e 6, que os valores do coeficiente de difusão efetivo dos grãos e frutos de amendoim, respectivamente, aumentam com o incremento da temperatura do ar de secagem. O aumento da temperatura promove a redução da viscosidade da água que é uma medida de resistência, com isso ocorrem alterações na difusão da água nos capilares dos produtos, tornando favorável o caminhamento desse fluido do interior para as extremidades dos grãos e frutos de amendoim. Quando se eleva a temperatura acaba havendo aumento nas vibrações moleculares da água, e isso contribui para que difusão ocorra mais rapidamente (GONELI et al., 2007). Normalmente o coeficiente de difusão efetivo é utilizado,

devido à complexidade além de limitadas informações a respeito do movimento da água no interior dos alimentos durante a secagem.

As variações entre os valores do coeficiente de difusão efetivo encontrada nos grãos de amendoim, no presente trabalho, ficaram entre $1,1831$ a $3,3502 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para a faixa de temperatura de 40 a 70°C . Com relação aos frutos de amendoim, essa variação assumiu valores entre $1,4760$ a $4,7062 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, na mesma faixa de temperatura, sendo estes valores superiores aos encontrados na difusão efetivo dos grãos. Esta diferença pode ser atribuída, provavelmente, à contração volumétrica dos grãos de amendoim durante a secagem, já que o raio equivalente, utilizado no presente trabalho, foi de $6,14 \text{ mm}$, enquanto que nos frutos de amendoim, foi de $8,97 \text{ mm}$. Segundo Madamba et al. (1996), os valores do coeficiente de difusão apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, ficando os valores do coeficiente de difusão dos grãos e frutos de amendoim dentro da faixa recomenda por estes autores.

1.3.2 - Influência da temperatura

As Figuras 5 e 6 mostram os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta ($1/\text{K}^{-1}$) obtidos para os grãos e frutos de amendoim, respectivamente.

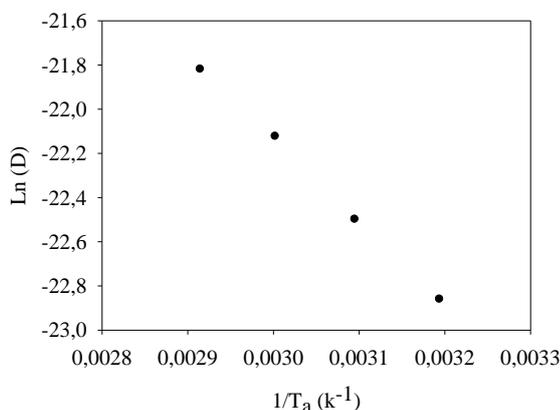


FIGURA 5. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem dos grãos de amendoim.

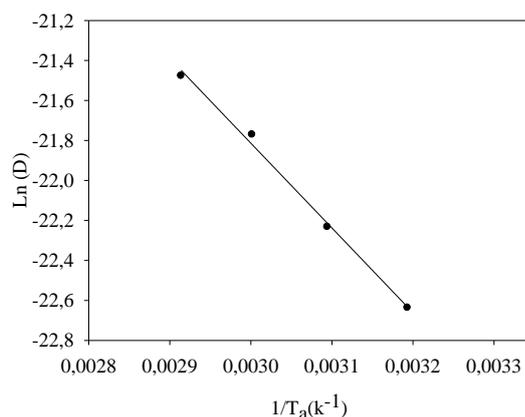


FIGURA 6. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo, em função da temperatura do ar, durante a secagem dos frutos de amendoim.

Observa-se nas Figuras 5 e 6, que os valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente sua dependência com relação à temperatura do ar de secagem, concordando com os resultados relatados por Costa et al. (2011) e Faria et al., (2012). A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação E_a/R , enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 . As Equações a seguir, apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos e frutos de amendoim, respectivamente, calculados de acordo com a Equação 16.

$$D_i = 1,9416 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{31.266,7998}{R T_a}\right) \quad (26)$$

$$D_i = 1,1211 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{35.244,7088}{R T_a}\right) \quad (27)$$

Podemos observar nas Equações 26 e 27 que, no presente trabalho, a energia de ativação para a difusão líquida durante a secagem foi de aproximadamente 31,27 e 35,24 kJ mol^{-1} , respectivamente para grãos e frutos de amendoim, na faixa de temperatura estudada (40, 50, 60 e 70°C). Corrêa et al. (2007b), admitem que a energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, uma vez que, nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade da água no produto. Na literatura especializada, são encontrados valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas, a exemplo de Costa et al. (2011), pesquisando sementes de

crambe encontraram valores em torno de 37,07 kJ mol⁻¹, Sousa et al., (2011), trabalhando com nabo forrageiro encontram valores próximos a 24,78 kJ mol⁻¹, Goneli et al., (2009), quando na ocasião trabalhavam com café com pergaminho, encontraram valores de energia de ativação de aproximadamente 55,40 kJ mol⁻¹, enquanto Resende et al., (2007) encontraram valores próximos a 40,08 kJ mol⁻¹, trabalhando com feijão vermelho. A energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹ (ZOGZAS et al., 1996), estando as energias de ativação encontradas no presente trabalho dentro da faixa destes valores propostos por estes autores.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo com relação à temperatura do ar de secagem tem sido satisfatoriamente descrita pela equação de Arrhenius, em outros trabalhos realizados por diferentes autores (OLIVEIRA et al., 2012; COSTA et al., 2011; CORRÊA et al., 2007b; GONELI et al., 2007; KASHANINEJAD et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2007).

No Quadro 7 podemos observar os valores das propriedades termodinâmicas (entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs) encontradas no processo de secagem dos grãos e frutos de amendoim em diferentes temperaturas.

QUADRO 7. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem dos grãos e frutos de amendoim

Temperatura (°C)	Grãos			Frutos		
	Δh	Δs	ΔG	Δh	Δs	ΔG
	kJ mol ⁻¹ K ⁻¹			kJ mol ⁻¹ K ⁻¹		
40	28,6632	-0,1824	85,7733	32,6411	-0,1678	85,1860
50	28,5800	-0,1826	87,5983	32,5580	-0,1681	86,8652
60	28,4969	-0,1829	89,4258	32,4748	-0,1683	88,5470
70	28,4138	-0,1831	91,2559	32,3917	-0,1686	90,2313

Os valores de entalpia sofreram redução durante a secagem dos grãos e frutos de amendoim, com o aumento da temperatura do ar (Quadro 7). Corrêa et al. (2010), trabalhando com café também observaram comportamento semelhante quanto a entalpia. Esse comportamento era esperado, uma vez que, imaginado o grão e o fruto de amendoim como um sistema termodinâmico, o aumento da temperatura do ar de secagem promove aumento da pressão parcial de vapor de água nos produtos, enquanto a do ar permanece constante. Assim, ocorre o aumento na velocidade da difusão de água do interior para a superfície do grão e do fruto e, conseqüentemente, perda de água dos produtos por dessorção. A energia necessária para a retirada da água dos produtos, que

na secagem ocorre por difusão, é composta pela entalpia de vaporização da água livre e a entalpia de vaporização da água no produto ou calor isostérico (GONELI et al., 2010). Uma vez que em todas as temperaturas do ar utilizadas a variação do teor de água inicial e final foi à mesma, a energia necessária para quebrar as ligações da água com água e água com superfície adsorvente (calor isostérico) foi constante, ocorrendo variação somente na entalpia de vaporização da água livre. Com o aumento da temperatura e conseqüente aumento da pressão parcial de vapor da água no interior do grão ocorre redução na entalpia de vaporização da água livre, e, portanto, no balanço de entalpia final, com a elevação da temperatura do ar de secagem ocorre redução na entalpia do processo de difusão de água no produto durante a secagem.

Analisando o comportamento da entropia no Quadro 7, observa-se que, tanto para os grãos bem como para os frutos de amendoim, esta propriedade termodinâmica comportou-se de forma similar à entalpia, onde seus valores foram reduzidos com o aumento da temperatura. A entropia é uma grandeza termodinâmica ligada ao grau de desordem, onde seus valores se elevam durante um processo natural em um sistema isolado (GONELI et al., 2010). Com a elevação da temperatura do ar de secagem e conseqüente aumento na pressão parcial de vapor da água no produto, também ocorre aumento na excitação das moléculas de e redução da viscosidade da água, fatores que combinados propiciam o aumento da velocidade do processo de difusão de água e redução da entropia no processo. Os valores negativos da entropia podem estar atribuídos à existência de adsorção química e ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

Ainda no Quadro 7, observa-se que, para os grãos e frutos do amendoim, houve aumento nos valores da energia livre de Gibbs, proporcionalmente ao aumento da temperatura do ar de secagem. Conforme já discutido anteriormente para entalpia e entropia, o aumento da temperatura do ar de secagem promove aumento na difusão de água para a superfície do produto, indicando maior trabalho realizado. A energia livre de Gibbs é uma função termodinâmica responsável por quantificar a máxima energia liberada em um processo sendo que, em condições de temperatura e pressão constantes, a energia livre de Gibbs pode servir de indicativo quanto ao trabalho útil realizado (NKOLO MEZE'E et al., 2008). Os valores positivos indicam que nas condições em que o presente trabalho foi realizado, a difusão de água no produto não foi espontânea e que houve consumo de energia do meio para que ocorresse a reação.

1.4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados encontrados neste trabalho, podemos concluir que:

- Dentre os modelos testados, Dois Termos, Henderson e Pabis Modificado, Midilli e Page apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais, sendo o modelo de Page selecionada para a representação da cinética de secagem dos grãos e frutos de amendoim em camada delgada.
- O coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura do ar de secagem e esta relação pode ser descrita pela equação de Arrhenius.
- A entalpia específica e a entropia específica tiveram seus valores reduzidos com o aumento da temperatura do ar de secagem, enquanto a energia livre de Gibbs teve seus valores aumentos.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S. A. et al. Desidratação osmótica do jenipapo (*Genipa americana* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 02, p. 276-281, 2003.
- AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v.59, p.99-104, 2003.
- BABALIS, S.J.; BELESSIOTIS, V.G. Influence of the drying condition on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.449-458, 2004.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, p.167-173, 1995.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p. 395, 2009.
- CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; JAREN, C.; RIBEIRO D.M.; RESENDE, O. Sorption isotherms and isosteric heat of peanut pods, kernels and hulls. **Food Science and Technology International**, v. 13, p 231, 2007a.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* l.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-507, 2007b.
- 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. **Rev. Ceres**, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.
- COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1089–1096, 2011.
- DIONELLO, R. G.; BERBERT, P.A.; MOLINA, M.A.B.; PEREIRA, R.C.; VIANA, A.P.; CARLESSO, V.O. Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 01, p. 232-240, 2009.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. Applied regression analysis.: John Wiley & Sons, 3th edition. New York. P. 712, 1998.
- ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.349-359, 2004.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA², I. R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.573–583, 2012.

GONELI, A. L. D. ; CORRÊA, P. C. ; AFONSO JÚNIOR, P. C. ; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. Café, n. 11, p. 64-73, 2009.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M. Water desorption and thermodynamic properties of okra seeds. **Transactions of the ASAE**, 53:191-197. 2010.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, p.1-8, 2011.

GONELI, A. L. D.; CORREA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, p.135-140, 2007.

HENRIQUES NETO, D.H.; TAVORA, F.J.A.F.; SILVA, F.P. ; SANTOS, M.A.; MELO, F.I.O. Componentes de produção e produtividade do amendoim submetido a diferentes populações e configurações de semeadura. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, Capina Grande, v. 2, n.2. p. 113- 122, 1998.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, p. 182–188. 2009.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.

KAYA, S.; KAHYAOGU, T. Influence of dehulling and roasting process on the thermodynamics of moisture adsorption in sesame seed. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 2, p. 139–147, 2006.

KEEY, R.B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press. p. 358, 1972.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v.61, p.173-179, 2004.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Enthalpy– entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v.28, p.109–119, 1996.

MADUREIRA, I.A.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M.; FILHO, E.D.S. Cinética de secagem da polpa do figo-da-india. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n. Especial, p.345-354, 2011.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, p.301-306, 2007.

MARTINAZZO A.P.; MELO E.C.; CORRÊA P.C.; SANTOS R.H.S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim limão *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. **Rev. Bras. Pl. Med.**, Botucatu, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

MENEGHETTI, V.L.; AOSAN, E.; ROCHA, J.; OLIVEIRA, M. ELIAS, M.C.; POHNDORF R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MCMINN, W.A.M.; AL-MUHTASEB, A.H.; MAGEE, T.R.A. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, 38:505–510. 2005.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, p.1503–1513, 2002.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. p.513-518, 2005.

MOREIRA R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, 88:514-521. 2008.

MOSHENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, p. 841, 1986.

NAYAK, L.; PANDEY, J.P. Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice. **Journal of the Institution of Engineers**, 80:43–45. 2000.

NKOLO MEZE'E, Y.N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy–entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. L'Éonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, 468:1–5. 2008.

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; CAMPOS, R.C.; CHAVES, T. H. Cinética de secagem dos grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, p. 190-201, 2012.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of halzenuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.225-233, 1999.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, p.349–357, 2002.

PEREZ, L.G.; OLIVEIRA, F.M.N.; ANDRADE, J. S.; FILHO, M.M. Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré-desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 102-106, jan-mar, 2013.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; JARÉN, C.; MOURE, A.J. Bean moisture diffusivity and drying kinetics: a comparison of the liquid diffusion model when taking into account and neglecting grain shrinkage. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.5, p.51-58, 2007.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, v.40, n 2, p. 247 – 256, 2010.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009

ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v.106, p.1428–1437, 2008.

SOUSA, F.C.; SOUSA, E. P.; SILVA, L.M.M.; MARTINS, J.J.A.; GOMES, J.P.; ROCHA, A.P.T. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de polpa de oiti. **Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior - ABEAS - v.26**, n.2, p.108-112, 2011.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v. 42, n. 4, p. 883-892, out-dez, 2011.

TELIS VRN, G.A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, 343:49–56. 2000.

ULLMANN, R. et al. Qualidade das sementes de pinhão mansos submetidas à secagem artificial. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 03, p. 442-447, 2010.

VENTURINI, T.; BENCHIMOL, L.R.; BERTUOL, D.A.; ROSA, M.B.; MEILI, L. Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (*Carica Papaya* L.). **Revista Eletronica em Gestao, Educacao e Tecnologia Ambiental**, v(5), nº5, p. 950 - 959, 2012.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-53, 1996.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FRUTOS E GRÃOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM

2.1. INTRODUÇÃO

O amendoim é uma oleaginosa que pode ganhar ainda mais espaço no cenário econômico brasileiro, devido à crescente busca por novas fontes alternativas de combustíveis. Os óleos provenientes de produtos vegetais aparecem como alternativa para a substituição dos tradicionais combustíveis originados do petróleo (FERRARI et al., 2005), surgindo à possibilidade de utilizar o óleo do amendoim como matéria-prima na produção de biodiesel. Este fato pode proporcionar um elevado potencial produtivo na região Centro Oeste, que é um dos principais polos produtivos do país.

O amendoim é constituído, em média por aproximadamente 70% de grãos ou sementes e 30% de casca, e é uma importante fonte de alimento, seja como óleo ou utilizado diretamente para consumo humano. Existem muitas espécies de amendoim, porém apenas representantes da *Arachis hypogaea* L. foram domesticadas e amplamente cultivadas.

Sendo necessária a expansão de novas áreas de plantio e com a adesão de um maior número de produtores pertencentes ao programa de agricultura familiar no estado do Mato Grosso do Sul, torna-se indispensável à procura por maiores informações sobre o comportamento da cultura do amendoim nessa região, com foco principal nos processos de operação pós-colheita.

Para a produção de produtos agrícolas sadios e de qualidade elevada é preferível que o produto seja colhido antecipadamente quando ainda apresenta elevado teor de água, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos e microrganismos. Assim a secagem, por sua vez, é o processo mais utilizado para assegurar a qualidade e a estabilidade dos grãos considerando que a redução da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento.

A redução do teor de água é um dos principais fatores que influenciam na variação das propriedades físicas dos materiais vegetais durante a secagem (RESENDE et al., 2005). Admitindo a particularidade de que cada produto, não só em relação a suas

características físicas, mas também pela sua composição química, torna seu comportamento único durante o processo de dessecamento. Logo, informações teóricas a respeito desta singularidade são de suma importância para auxiliar no processamento pós-colheita, além de fornecer um conjunto de dados aos engenheiros e projetistas, que servirão de base na elaboração de máquinas, estruturas, processos de controle e proporcionar melhor eficiência de um equipamento ou operação.

A caracterização física necessita de critérios definidos, levando em consideração a variabilidade existente, que no caso do amendoim ocorre com uma série de caracteres, além do mais, os frutos de amendoim possuem dimensões bem distintas em comparação aos seus grãos. Seguindo este contexto, o conhecimento sobre as propriedades físicas do amendoim, apresentadas durante a secagem, é de fundamental importância para o correto manejo desta cultura após a colheita, a fim de minimizar os custos de produção para maior competitividade e manutenção da qualidade do produto. Informações como: tamanho, volume, porosidade e massa específica, entre outras, são ferramentas importantes no estudo envolvendo transferência de calor e massa e movimentação de ar em uma massa de grãos (GONELI et al., 2011).

Normalmente o volume dos produtos, é a característica física que mais sofre variação durante a secagem, proporcionando muitas das vezes, redução no seu tamanho ou até mesmo na sua forma geométrica, e são estas características que determinam o tamanho e a forma dos furos das peneiras utilizadas no beneficiamento dos produtos agrícolas após a colheita. De acordo com Mayor e Sereno (2004), a redução do teor de água do produto pode causar danos em suas estruturas celulares causando variações na forma e redução em suas dimensões.

A porosidade intergranular pode ser entendida como a porcentagem do volume total ocupada pelo ar em uma massa de produto, e esse percentual de espaços vazios depende do tamanho e forma do material, assim como das características de sua superfície. Uma massa de produto com superfície rugosa tende a apresentar mais espaços vazios do que uma massa de grãos com superfície lisa. Mata e Duarte (2002), admitem que o conhecimento da porosidade de uma massa de grãos, é uma importante ferramenta no dimensionamento de silos, contêineres, caixas, embalagens, unidades transportadoras, além de estar contida dentro dos estudos da transferência de calor e massa, nos processos hidrodinâmicos, aerodinâmicos e termoelétricos.

Outra característica física de grande relevância é a massa específica aparente e a massa específica unitária dos produtos agrícolas. As informações fornecidas por esta

propriedade física são capazes de auxiliar no dimensionamento de silos, cálculo de transportadores, separadores e classificadores de grãos e sementes. Diversos são os fatores que afetam a massa específica dos materiais vegetais, sendo que os principais deles são o teor de água, a forma e a superfície dos produtos. Além disso, o que também pode afetar a massa específica aparente e unitária é o fato de alguns produtos agrícolas, como o fruto de amendoim, apresentar grãos no seu interior. Sirisomboon et al., (2007), apresentaram as propriedades físicas, área superficial, área projetada, volume, circularidade e esfericidade dos frutos, nozes e sementes, como sendo indispensáveis no dimensionamento de máquinas e equipamentos capazes de realizar o processo de descasque. Esse tipo de informação também pode ser utilizada para determinar o limite inferior do tamanho dos transportadores, como esteira, elevador de caneca e transportador helicoidal.

Sabendo que a secagem é uma das etapas mais importantes durante a fase pós-colheita de produtos agrícolas, torna-se imprescindível o conhecimento do comportamento das propriedades físicas dos grãos e frutos de amendoim. Nesse sentido inúmeros autores têm investigado as variações das propriedades físicas em função do teor de água e de outros fatores durante a secagem, para diversos produtos (SIQUEIRA et al., 2012; LANARO et al., 2011; TAVAKOLI et al., 2009; KIBAR e ÖZTÜRK 2008; FATHOLLAHZADEH et al., 2008; MILANI et al., 2007; RAZAVI et al., 2007; CORRÊA et al., 2006)

Considerando a importância do processo de secagem e da necessidade de informações para o desenvolvimento de equipamentos utilizados no processamento da cultura do amendoim, este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar o efeito do teor de água sobre as principais propriedades físicas dos frutos e grãos de amendoim, como: massa específica aparente e unitária, porosidade, massa de mil grãos, forma, área projetada, área superficial, relação área superficial/massa e a relação superfície/volume.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados, MS.

Os frutos de amendoim foram colhidos manualmente, para evitar qualquer tipo de influência no produto. Após a colheita houve uma seleção dos frutos, onde procurou-se retirar todos aqueles defeituosos, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse atrapalhar ou interferir nos resultados da pesquisa. Posteriormente os grãos foram retirados manualmente dos frutos, seguindo o mesmo critério de seleção. Inicialmente os frutos apresentaram valores do teor de água próximos a 0,63 decimal b.s., e os grãos apresentaram um teor de água de aproximadamente 0,56 decimal b.s.

Os grãos e frutos de amendoim foram secos em uma estufa com ventilação forçada, a uma temperatura de 40 °C. A redução do teor de água foi acompanhada, com auxílio de uma balança com resolução de 0,01g, pelo método gravimétrico ou perda de massa, (conhecendo-se o teor de água inicial do produto), até os frutos e grãos atingirem o teor de água final de aproximadamente 0,04 decimal b.s. Os teores de água dos produtos foram determinados pelo método gravimétrico em estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24h, em duas repetições (Brasil, 2009).

2.2.1. Massa específica aparente e real

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi determinada para os grãos e frutos de amendoim utilizando um recipiente em PVC, de formato cilíndrico com relação altura/diâmetro de 1:1, sendo que para os grãos o volume do recipiente foi de 1 litro e para os frutos o recipiente continha 2 litros. A cada período de amostragem os produtos foram acondicionados em seus respectivos recipientes, onde pode-se realizar as leituras do volume de cada produto, logo após, cada recipiente contendo grãos e frutos, foram pesados em uma balança com resolução de 0,01g,

Para a determinação da massa específica real ou unitária, 10 grãos e 10 frutos, foram escolhidos ao acaso e secos individualmente, sendo realizadas leituras periódicas durante a secagem. Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de

0,01mm, foram realizadas medidas em todas as dimensões características dos produtos como: comprimento (a), largura (b) e espessura (c), ilustrado na Figura 1.

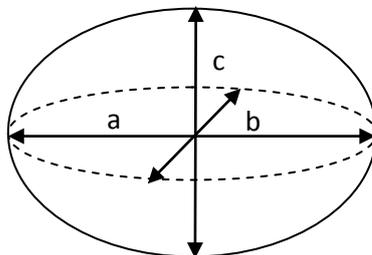


FIGURA 1. Desenho esquemático dos frutos e grãos do amendoim, considerada um esferoide tri axial, com suas dimensões características.

A determinação do volume (V_g), para cada teor de água dos grãos e frutos, foi baseada na equação proposta por Mohsenin, (1986), mostrada a seguir:

$$V_g = \frac{\pi(a b c)}{6} \quad (1)$$

em que:

V_g : volume, mm³;

a : comprimento, mm;

b : largura , mm; e

c : espessura, mm.

Foram realizados, testes preliminares com solução de tolueno, onde seus resultados puderam validar a equação (1), tanto para os grãos como para os frutos. Após a determinação do volume, os grãos e frutos de amendoim foram pesados, utilizando-se uma balança com resolução de 0,001g. A massa específica unitária foi determinada pela seguinte equação:

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_g} \quad (2)$$

em que:

ρ_u : massa específica unitária, kg.m^{-3} ; e

m_g : massa de um fruto ou grão de amendoim.

2.2.2. Porosidade da massa

A porosidade da massa dos grãos e frutos de amendoim foi determinada pela seguinte relação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \quad (3)$$

em que:

ε : porosidade, %; e

ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} .

2.2.3. Massa de 1000 frutos e grãos

A massa de 1000 de grãos e frutos foi determinada de acordo com a Regra de Análise de Sementes – (RAS), a partir da escolha aleatória de 100 frutos e grãos de amendoim para cada teor de água ao longo da secagem. Utilizando-se uma balança com resolução de 0,01 g, em oito repetições, foi realizada a pesagem da massa dos produtos, e os resultados foram ajustados para 1000, (BRASIL 2009).

2.2.4. Forma

A forma dos grãos e frutos de amendoim foi caracterizada pela esfericidade e circularidade. A esfericidade (E_s) foi calculada utilizando-se a expressão a seguir, proposta por Mohsenin (1986):

$$E_s = \left[\frac{(a b c)^{1/3}}{a} \right] 100 \quad (4)$$

em que:

E_s : esfericidade, %;

A circularidade (C) dos produtos foi determinada pela seguinte expressão (MOHSEIN, 1986):

$$C = \left(\frac{b}{a} \right) 100 \quad (5)$$

em que:

C: circularidade, %;

2.2.4.1. Área projetada

A área projetada (A_p), em mm^2 , dos grãos e frutos de amendoim foi determinada pela seguinte expressão:

$$A_p = \frac{\pi a b}{4} \quad (6)$$

em que:

A_p : área projetada, mm^2 ;

2.2.4.2. Área superficial

A área superficial (S), em mm^2 , dos grãos e frutos de amendoim, foi calculada pelo modelo de Mohsenin (1986), onde são realizados ajustes nas dimensões características do produto, utilizando a seguinte expressão:

$$S = \frac{\pi B^2}{2} + \frac{\pi a B}{2e} \sin^{-1} e \quad (7)$$

onde:

$$B = (bc)^{1/2} \quad (8)$$

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{B}{a}\right)^2} \quad (9)$$

em que:

S: área superficial, mm²;

e: excentricidade

Outro método empregado para calcular a área superficial dos grãos e frutos de amendoim, foi utilizando a equação da superfície da esfera, onde é levado em consideração o diâmetro da esfera equivalente dos produtos (D_g), equação esta também utilizada por Tunde-Akintunde e Akintunde (2004).

$$S = \pi (D_g)^2 \quad (10)$$

onde:

$$D_g = (abc)^{1/3} \quad (11)$$

A relação entre a área superficial (S) e a massa dos grãos e frutos, foi determinada segundo a equação (MOHSENIN 1986):

$$S = \xi W^d \quad (12)$$

em que:

S: área superficial;

D_g diâmetro geométrico;

ξ e d: constantes da relação, adimensionais; e

W: massa, gramas.

A relação superfície/volume (SV), dos grãos e frutos de amendoim, foi calculada por meio da expressão seguinte:

$$SV = \frac{S}{V_g} \quad (13)$$

2.2.5. Análise estatística

Os dados experimentais referentes às propriedades físicas dos grãos e frutos de amendoim foram submetidos à análise de regressão linear. Para o ajuste dos modelos de regressão, utilizou-se o programa computacional STATISTICA 7.0[®]. O nível de significância da regressão, juntamente com os valores do coeficiente de determinação (R²), pelo teste t, serviu de parâmetros para seleção do modelo.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Propriedades físicas dos grãos de amendoim

Na Figura 2, são apresentados os valores experimentais e estimados da massa específica aparente dos grãos de amendoim, para diferentes teores de água durante a secagem.

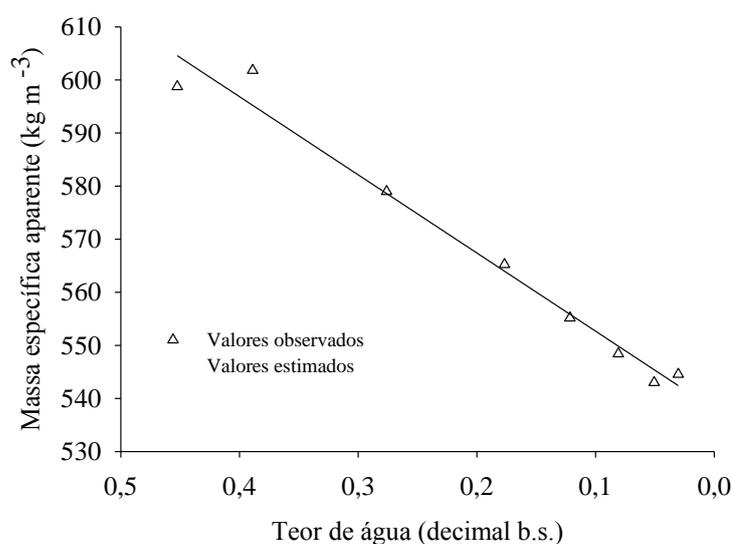


FIGURA 2. Valores observados e estimados da massa específica aparente dos grãos de amendoim em função do teor de água.

De acordo com a Figura 2, nota-se que houve redução nos valores da massa específica aparente dos grãos de amendoim com a redução do teor de água durante a secagem. Este comportamento contraria a maioria dos produtos agrícolas, onde é observado o aumento dos valores da massa específica aparente em função da redução do teor de água (TAVAKOLI et al., 2009; KIBAR, 2008; GARNAYAK et al., 2008; FATHOLLAHZADEH et al., 2008; DURSUN et al., 2007; KARABABA, 2006). Provavelmente estes resultados estejam associados à maior contração na parte interna dos cotilédones, ao passo que, suas dimensões externas contraem em menor quantidade. Fato este proporciona baixa variação do volume do produto em relação à elevada perda de massa, permitindo a redução dos valores da massa específica aparente dos grãos de amendoim. Bande et al. (2012), pesquisando sementes de melão, Goneli et al. (2008) trabalhando com mamona e Razavi et al. (2007) trabalhando com pistache também encontraram resultados semelhantes aqueles observados no presente estudo. Os valores

da massa específica aparente dos grãos de amendoim (Figura 2), variaram de 598 a 544 kg m^{-3} , para uma faixa de teor de água de 0,56 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. E estes valores podem ser satisfatoriamente representados por um modelo de regressão linear, com elevado nível de significância (Quadro 2).

Na Figura 3, são apresentados os valores experimentais e estimados da massa específica unitária dos grãos de amendoim, em função do teor de água decimal b.s.

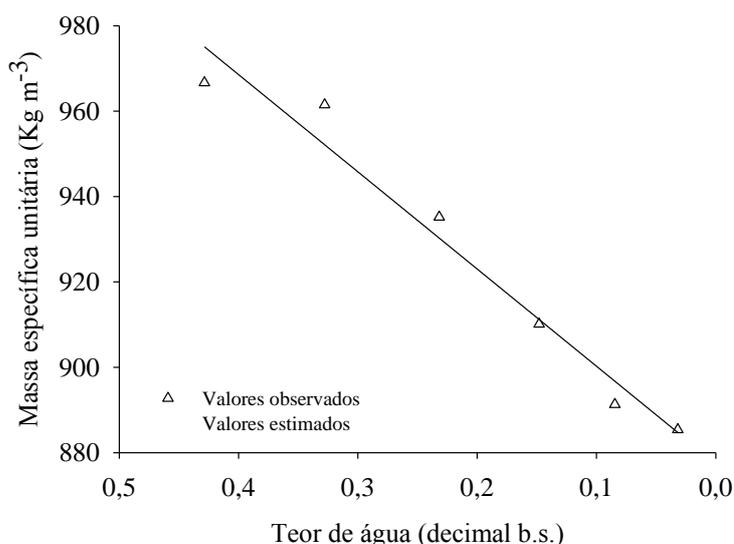


FIGURA 3. Valores observados e estimados da massa específica unitária dos grãos de amendoim em função do teor de água.

Observa-se na Figura 3, que o decréscimo dos valores da massa específica unitária dos grãos de amendoim, é proporcional à redução do teor de água do produto, provavelmente devido ao efeito combinado entre a deformação do grão e a presença de espaços vazios no seu interior, ao mesmo tempo em que ocorre a redução da massa. Valores estes mostram que a redução do volume dos grãos de amendoim não acompanha a perda de massa em forma de vapor de água, durante o período de secagem. Estes resultados também foram observados por Garnayak et al. (2008), quando trabalhava com sementes de pinhão manso, Razani et al. (2007) pesquisando grãos de pistache e Milani et al. (2007), trabalhando com sementes de cucurbitáceas.

Na Figura 3, a massa específica unitária dos grãos de amendoim apresentam variações em seus valores numa ordem de 966 a 885 kg m^{-3} , para a faixa de teor de água de 0,56 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. Ainda na mesma figura, também é possível verificar que a redução dos valores da massa específica unitária dos grãos de

amendoim pode ser satisfatoriamente representada por um modelo de regressão linear simples (Quadro 2).

Na Figura 4, são apresentados os valores experimentais e estimados da porosidade dos grãos de amendoim, em função do teor de água decimal b.s.

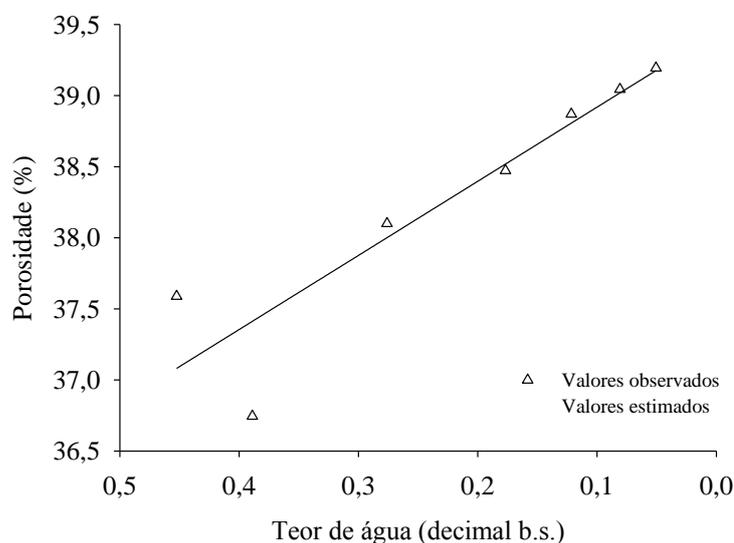


FIGURA 4. Valores observados e estimados da porosidade dos grãos de amendoim em função do teor de água.

De acordo com a Figura 4, observa-se que os valores da porosidade da massa de grãos de amendoim crescem com a redução do teor de água do produto. A determinação da porcentagem dos espaços vazios da massa dos grãos de amendoim foi de forma indireta, levando em conta os valores da massa específica aparente e massa específica unitária, onde o comportamento da curva da porosidade dos grãos assemelhou-se aquela encontrada nas sementes de melão (BANDE et al., 2012), no pistache (RAZAVI et al., 2007) e nas sementes de soja (KIBAR e ÖZTÜRK, 2008), diferentemente da maioria dos produtos agrícolas, onde há redução da porosidade com a redução do teor de água (GARNAYAK et al., 2008; KARABABA, 2006; CORRÊA et al., 2006; RIBEIRO et al., 2005). A porosidade da massa dos grãos de amendoim variou de 37,60 a 39,19%, numa faixa de teor de água de 0,56 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. O modelo de regressão linear representa satisfatoriamente os valores experimentais e sua equação pode ser observado no Quadro 2.

O efeito da variação do teor de água na massa de mil grãos de amendoim pode ser visualizado na Figura 5.

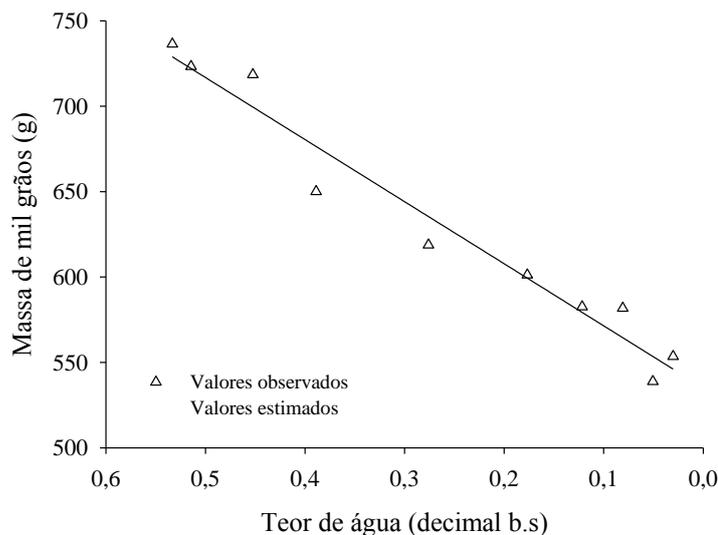


FIGURA 5. Valores observados e estimados da massa de mil sementes de amendoim em função do teor de água.

Observa-se na Figura 5 que a redução do teor de água acarretou na redução da massa dos grãos de amendoim. Durante a secagem ocorre remoção de água, devido à diferença de pressão parcial de vapor entre o produto a ser seco e o ar que o envolvia, e esse processo influencia diretamente na redução da massa dos grãos. O fenômeno observado na Figura 5 pode ser representado adequadamente por um modelo de regressão linear, com elevado valor do coeficiente de determinação (R^2) e alto nível de significância, podendo ser encontrados no Quadro 2. Estes resultados concordam com os obtidos por outros pesquisadores que observaram comportamento semelhante para diversos produtos agrícolas (BANDE et al., 2012; LANARO et al., 2011; GONELI et al., 2008; AYDIN, 2007; DURSUN et al., 2007). É possível verificar ainda na Figura 5 que a massa dos grãos de amendoim variou de 736 a 553g, em uma faixa de teor de água de 0,56 a 0,04 decimal b.s., respectivamente.

No Quadro 1, são apresentados os valores das dimensões características (a, b, c), o diâmetro geométrico médio (D_g), os índices de contração das dimensões características (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), o volume (V), a circularidade (C) e a esfericidade (E) dos grãos de amendoim em função do teor de água decimal b.s.

QUADRO 1. Dimensões características (a, b, c, D_g), volume (V), índices de contração (a/a₀, b/b₀ e c/c₀), circularidade (C) e esfericidade (E) dos grãos de amendoim em função do teor de água.

Teor de água (b.s.)	Dimensões características (mm)				Volume mm ³	a/a ₀	b/b ₀	c/c ₀	C (%)	E (%)
	a	b	c	D _g						
0,56	17,21	11,10	10,68	12,68	1067,92	1,00	1,00	1,00	64,49	73,71
0,43	16,74	10,77	10,22	12,26	965,19	0,97	0,97	0,96	64,35	73,24
0,33	16,48	10,57	9,93	12,00	905,06	0,96	0,95	0,93	64,15	72,85
0,23	16,29	10,48	9,66	11,81	863,15	0,95	0,94	0,90	64,32	72,52
0,15	16,16	10,36	9,39	11,63	823,50	0,94	0,93	0,88	64,12	71,97
0,08	16,03	10,36	9,10	11,47	791,08	0,93	0,93	0,85	64,62	71,60
0,03	15,87	10,29	8,97	11,36	766,66	0,92	0,93	0,84	64,82	71,54

De acordo com o Quadro 1, verifica-se redução nos valores das dimensões características dos grãos de amendoim (comprimento, largura e espessura), assim como nos valores do diâmetro geométrico médio, com a redução do teor de água. Ainda nesta figura observa-se que, como a maioria dos produtos vegetais, o volume dos grãos de amendoim também tem seus valores reduzidos junto à redução do teor de água do produto. Esses resultados são condizentes com os encontrados por Bande et al. (2012) trabalhando com sementes de melão; Goneli et al. (2011), sementes de mamona; e Razavi et al. (2007), grãos de pistache.

No que diz respeito ao índice de contração das dimensões dos grãos de amendoim (Quadro 1), pode-se observar que no local onde há a junção dos cotilédones (espessura) ocorre uma contração mais acentuada, com o grão encolhendo 16%, enquanto que nas outras dimensões, o comprimento do grão de amendoim reduz 8% e a largura 7%, isso para a mesma faixa de teor de água. Assim como a maioria dos produtos agrícolas, os grãos de amendoim possuem encolhimento ligeiramente desuniforme em suas dimensões características, durante o processo de secagem. Goneli et al. (2011), pesquisando sementes de mamona também observaram resultados semelhantes, assim como Resende et al. (2005), trabalhando com grãos de feijão. As informações adquiridas neste trabalho servirão de base para o desenvolvimento de projetos destinados a pós-colheita.

Observa-se no Quadro 1 que a circularidade dos grãos de amendoim praticamente não sofreram alterações em seus valores com a redução do teor de água. De modo geral, este fato evidencia que a baixa redução das magnitudes do comprimento e da largura dos grãos de amendoim influenciou na porcentagem da circularidade, uma

vez que os valores destas dimensões foram utilizados no cálculo da circularidade dos grãos. Corrêa et al. (2006), trabalhando com grãos de trigo também encontraram reduzidas variações nos valores da circularidade durante a secagem, o mesmo ocorrendo no trabalho desenvolvido por Goneli et al. (2011), com frutos de mamona. Quanto a esfericidade, observa-se um gradiente de redução dos seus valores com o decréscimo do teor água, contrariando Guedes et al. (2011) que observaram aumento nos valores da esfericidade nos grãos de soja, em função da redução do teor de água. Tanto a esfericidade bem como a circularidade mantiveram seus valores abaixo de 80%, evidenciando a incapacidade de classificação como esféricos e circulares, independente do teor de água que apresentem.

Na Figura 6, são encontrados os valores da área projetada dos grãos de amendoim em função da redução do teor de água décima b.s., durante a secagem.

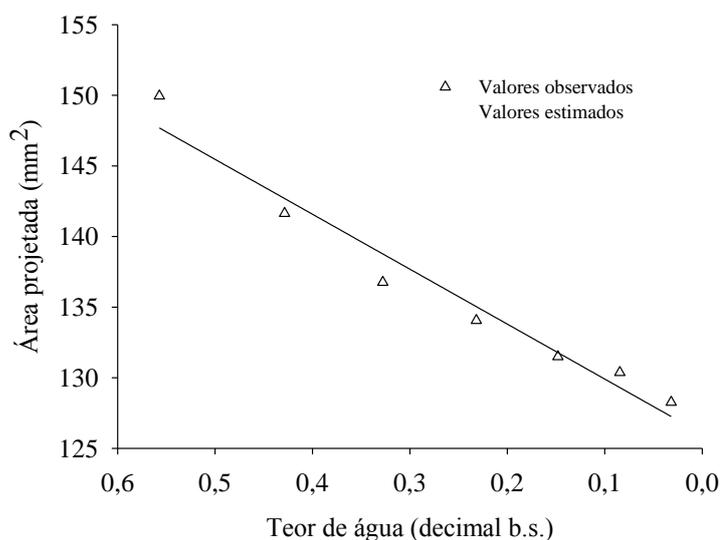


FIGURA 6. Valores observados e estimados da área projetada dos grãos de amendoim em função do teor de água.

Observa-se na Figura 6, que os valores da área projetada dos grãos de amendoim decresceram com a redução do teor de água. Esse fenômeno ocorre devido à contração volumétrica dos grãos de amendoim durante o processo de secagem, ou seja, o processo de desumidificação colabora para redução das dimensões características do produto, evidenciando o encolhimento dos grãos de amendoim. A redução da área projetada com a redução do teor de água também vem sendo observada por diversos pesquisadores (GUEDES et al., 2011; GONELI et al., 2008; AYDIN, 2007; COŞKUNER e KARABABA, 2007; DURSUN et al., 2007; YALÇIN et al., 2007).

Ainda na Figura 6, pode-se observar que, a redução nos valores da área projetada, foi satisfatoriamente representada por um modelo de regressão linear simples, onde sua equação apresenta-se no Quadro 2.

Na Figura 7, apresenta-se a relação superfície/volume dos grãos de amendoim em função da redução do teor de água decimal b.s., durante a secagem.

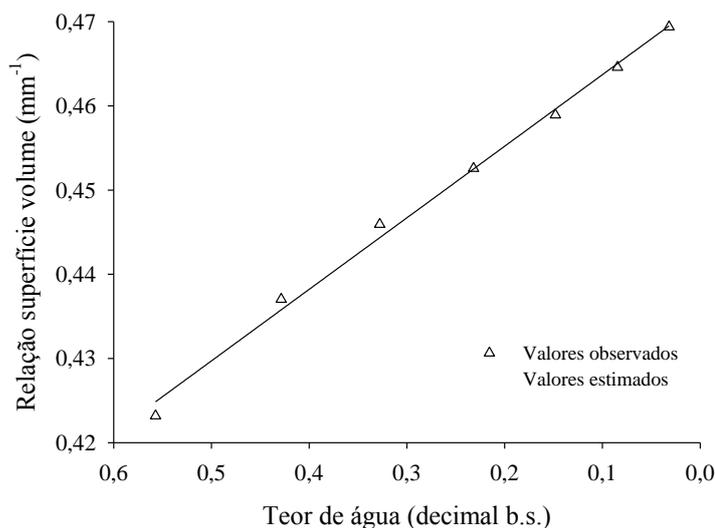


FIGURA 7. Relação superfície volume dos grãos de amendoim em função do teor de água em estudo.

Verifica-se na Figura 7 que, nas condições de secagem analisadas, a redução do teor de água proporcionou um aumento na relação superfície/volume dos grãos de amendoim. Ainda na Figura 7 observa-se que, o fenômeno em estudo pode ser satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear simples, onde sua equação se encontra no Quadro 2. A relação superfície volume dos grãos de amendoim variou aproximadamente, 0,42 a 0,47 mm⁻¹, para a faixa de teor de 0,56 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. De acordo com Farinha (2008), se os fatores envolvidos no processo forem apenas físicos, a redução do teor de água é proporcional à relação superfície/volume e admitindo que a forma do produto seja constante, a relação superfície/volume aumenta com a redução do tamanho.

Na Figura 8 são apresentadas as variações na área superficial dos grãos de amendoim, em função do teor de água decimal b.s.

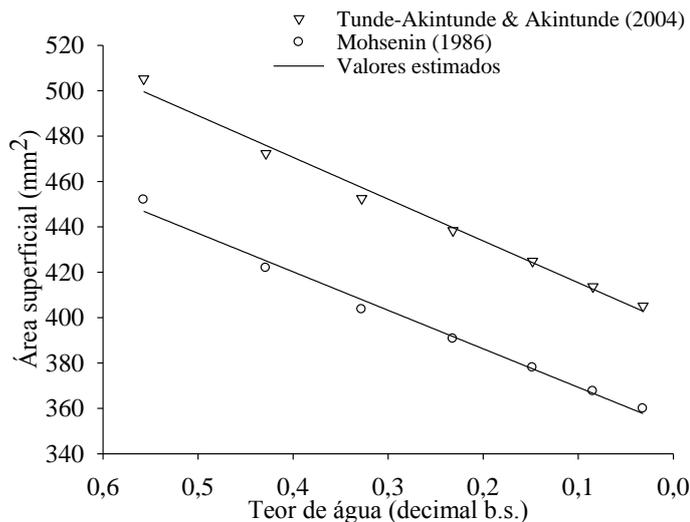


FIGURA 8. Valores observados e estimados da área superficial dos grãos de amendoim em função do teor de água.

Observa-se na Figura 8, que os valores da área superficial dos grãos de amendoim decresceram com a redução do teor de água, fenômeno este também observado por Bande et al., (2012) para sementes de melão, Kibar e Öztürk, (2008), para grãos de soja e Razavi et al. (2007) para grãos de pistache. Apesar da discrepância entre os valores apresentados, nota-se que em ambos os modelos ocorreu uma redução em torno de 20% na área superficial dos grãos de amendoim.

Pode-se dizer que o modelo de Mohsenin, (1986) possui valores mais próximos do real, no diz respeito à área superficial dos grãos de amendoim, uma vez que, sua equação propõe ajustes matemáticos nas principais dimensões características do produto, quando comparado à equação da superfície da esfera.

A relação entre a área superficial/massa dos grãos de amendoim, determinada por meio de análise de regressão não linear, juntamente com os valores dos seus parâmetros, encontram-se no Quadro 2.

A determinação da área superficial dos produtos agrícolas é um processo difícil e um tanto complexo de ser realizado, devido à maioria dos produtos agrícolas não apresentarem uma uniformidade e homogeneidade. Com isso, leva-se um tempo maior para obtenção de informação referente à área superficial, sem contar que a margem de erros torna-se maior quando não há um número adequado de repetições. A partir disso esta equação propõe que, com a obtenção do valor da massa do produto por meio de uma balança de pesagem simples, a mesma tem a capacidade de determinar os valores de área superficial do produto. Este tipo de informação é essencial para o

desenvolvimento e melhoria dos equipamentos de secagem e podem ajudar os estudos referentes à transferência de calor e massa. Goneli et al. (2008), trabalhando com grãos de mamona, também encontraram resultados semelhantes a estes, onde observaram valores elevados do coeficiente de determinação.

No Quadro 2, são apresentados os modelos ajustados aos dados observados para as diversas propriedades físicas estudadas nos grãos de amendoim, em função do teor de água decimal b.s. Os modelos mostraram-se adequados em estimar as propriedades físicas dos grãos de amendoim, apresentando elevados valores do coeficiente de determinação (R^2), e apresentando significância satisfatória dos modelos.

QUADRO 2. Equações ajustadas aos valores das propriedades físicas dos grãos de amendoim em função do teor de água

Variável analisada	Modelo	R^2 (decimal)	F	P_{level}
Massa específica aparente	$\rho_a = 537,9484 + 147,2658 * M$	0,9765	249,7240	<0,0001
Massa específica unitária	$\rho_u = 877,4819 + 227,7023 * M$	0,9649	110,1221	<0,0005
Porosidade	$\varepsilon = 39,4400 + (-5,2140 * M)$	0,8458	27,4247	<0,0034
Massa de mil grãos	$M_{1000} = 535,0860 + 363,4788 * M$	0,9589	186,5029	<0,0001
Área projetada	$A_p = 126,0154 + 38,9016 * M$	0,9608	227,9611	<0,0001
Área superficial ¹	$S = 396,9478 + 184,2159 * M$	0,9897	478,9069	<0,0001
Área superficial ²	$S = 352,3051 + 169,7053 * M$	0,9903	509,0245	<0,0001
Relação superfície/volume	$S/V = 0,4722 + (-0,0850 * M)$	0,9952	1036,3943	<0,0001
Relação superfície/massa	$S/M = (441,8476 * W^{0,5464})$	0,9825	280,1107	<0,0001

¹ Área superficial calculada pela Equação 10 (Tunde-Akintunde e Akintunde, 2004);

² Área superficial calculada pela Equação 7 (Mohsenin, 1986);

M = teor de água (decimal b.s.);

*Significância a 1%, teste t.

2.3.2 Propriedades físicas dos frutos de amendoim

Nas Figuras 9 e 10, respectivamente, são apresentados os valores experimentais e estimados da massa específica aparente e unitária dos frutos de amendoim, para diferentes teores de água durante a secagem.

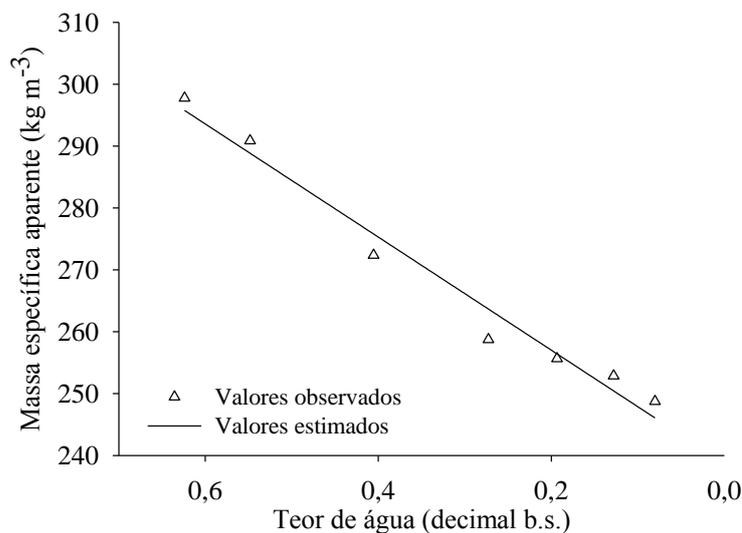


FIGURA 9. Valores observados e estimados da massa específica aparente dos frutos de amendoim em função do teor de água.

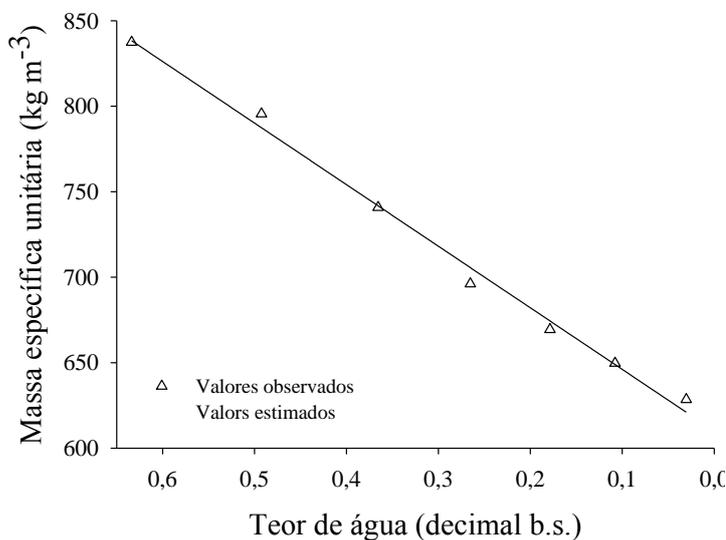


FIGURA 10. Valores observados e estimados da massa específica unitária dos frutos de amendoim em função do teor de água.

Verifica-se na Figura 9, que houve redução na massa específica aparente dos frutos de amendoim ao longo da secagem, contrariando a maioria dos produtos agrícolas, independentemente da metodologia utilizada. Razavi et al. (2007) trabalhando com pistache também encontraram resultados semelhantes aqueles observados no

presente estudo. Observa-se que, a massa específica aparente dos frutos de amendoim tem seus valores reduzidos de forma linear, com o tempo de secagem. Os grãos de amendoim também apresentaram redução nos valores de massa específica aparente com a redução do teor de água, devido a menor variação do volume em relação a maior variação da massa. Durante o processo de secagem verificou-se que, com a redução do teor de água os frutos se distribuíram mais uniformemente dentro da proveta.

Observa-se também na Figura 9 que, os valores experimentais da massa específica aparente dos frutos de amendoim variaram de 297 a 248 kg m⁻³, em uma faixa de teor de água de 0,63 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. Ainda nesta figura nota-se que, a redução dos valores da massa específica aparente pode ser satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear simples (Quadro 4). Siqueira et al. (2012), encontraram resultados semelhantes a estes, onde houve redução nos valores de massa específica aparente dos frutos de pinhão-manso.

Assim como a massa específica aparente, os valores da massa específica unitária dos frutos de amendoim também sofreram redução, com a redução do teor de água (Figura 10). Esses resultados podem estar relacionados ao fato de que, a maioria dos frutos de amendoim são compostos por grãos, e seu encolhimento não é proporcional a perda de massa, durante o processo de secagem. Estes resultados foram observados por outros pesquisadores: frutos de mamona (GONELI et al., 2008), pistache (RAZAVI et al., 2007), arroz em casca (REDDY e CHAKRAVERTY, 2004), sementes de abóbora (PAKSOY e AYDIN, 2004).

Na Figura 10, os valores experimentais da massa específica unitária dos frutos de amendoim variaram de 837 a 628 kg m⁻³, para a faixa de teor de água de 0,63 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. O modelo de regressão linear, ajustados aos dados observados da massa específica unitária dos frutos de amendoim, bem como seu coeficiente de determinação, são apresentados no Quadro 4.

Na Figura 11, estão apresentados os valores experimentais e estimados da porcentagem de espaços vazios na massa dos frutos de amendoim em função do teor de água decimal b.s.

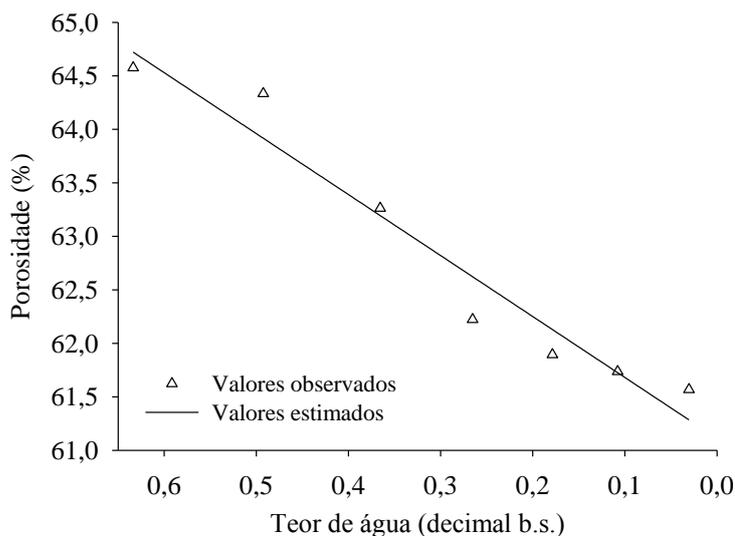


FIGURA 11. Valores observados e estimados da porosidade dos frutos de amendoim em função do teor de água

Observando a Figura 11, pode-se notar que a porosidade da massa dos frutos de amendoim apresentou um comportamento semelhante aquele encontrado na maioria dos produtos agrícolas, onde seus valores foram reduzidos com o decréscimo do teor de água (SIQUEIRA et al., 2012; GONELI et al., 2008; FATHOLLAHZADEH et al., 2008; DURSUN et al., 2007; KARABABA, 2006). Ao decorrer do processo de secagem torna-se possível observar uma gradativa contração volumétrica dos frutos de amendoim, proporcionando a redução dos espaços intergranulares, onde por meio da determinação indireta da porosidade, pode-se chegar aos resultados encontrados no presente estudo. A porosidade da massa dos frutos de amendoim foi de 64,57 para 61,53% numa faixa de teor de água de 0,63 a 0,04 decimal b.s., respectivamente. Essa pequena variação da porosidade, provavelmente esteja relacionada à reduzida capacidade dos compostos estruturais que formam a casca dos frutos em diminuir o seu volume. Ainda na Figura 11 nota-se que, a redução dos valores da porosidade da massa dos frutos de amendoim pode ser representada satisfatoriamente por meio de um modelo de regressão linear simples (Quadro 4).

Na Figura 12 são apresentados os efeitos da variação do teor de água na massa de mil frutos de amendoim, em função da secagem.

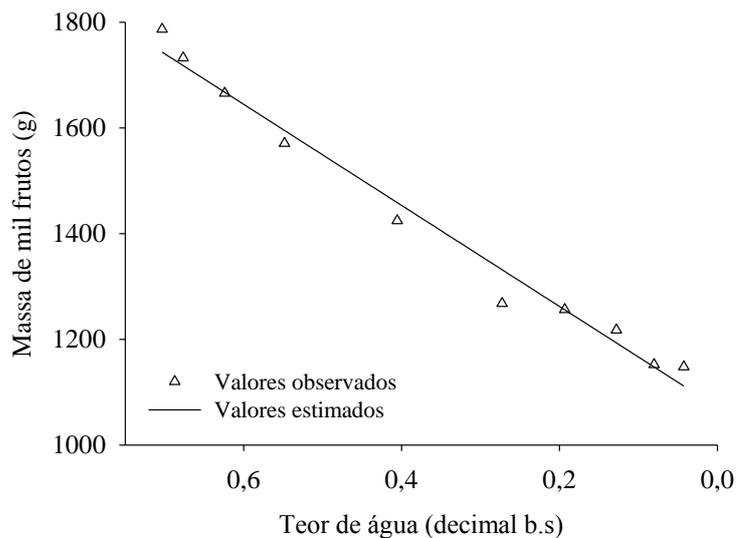


FIGURA 12. Valores observados e estimados da massa de mil frutos de amendoim em função do teor de água

Como pode ser observado na Figura 12, a redução do teor de água do produto proporciona a também redução dos valores da massa de mil frutos, verifica-se ainda que, com a redução do teor de água de 0,70 para 0,04 decimal b.s., a massa de mil frutos de amendoim variou de 1786 a 1147g, respectivamente. Estes resultados concordam com os obtidos por outros pesquisadores que observaram comportamento semelhante para diversos produtos agrícolas (BANDE et al., 2012; GONELI et al., 2008; AYDIN, 2007; DURSUN et al., 2007). O modelo linear foi o que melhor se adequou aos dados experimentais, apresentando elevado nível de significância e elevado valor do coeficiente de determinação, (Quadro 4).

No Quadro 3, são apresentados os valores das dimensões características (a, b, c), o diâmetro geométrico médio (D_g), o volume (V), os índices de contração das dimensões características (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), da circularidade (C) e da esfericidade (E) dos frutos de amendoim em função da secagem.

De acordo com o Quadro 3, assim como nos grãos de amendoim, os frutos também apresentaram os mesmos comportamentos com relação às suas dimensões características (comprimento, largura e espessura), onde seus valores foram reduzidos com o decréscimo do teor de água devido à secagem. Resultados semelhantes a estes foram encontrados por outros pesquisadores (GONELI et al., 2011; RAZAVI et al., 2007; CORRÊA, et al 2006; RESENDE et al., 2005). Ainda no Quadro 3 nota-se que, a mesma tendência observada no comportamento das dimensões dos frutos em relação a redução do teor de água, também foi observada para os valores do diâmetro geométrico

médio. Observa-se também neste quadro que o volume dos frutos de amendoim tem seus valores reduzidos com a redução do teor de água, de forma menos intensa quando comparado a redução do volume dos grãos de amendoim, provavelmente esta diferença esteja ligada a composição físico-química dos produtos. Siqueira et al. (2012), observaram resultados semelhante aquele encontrados neste trabalho.

QUADRO 3. Dimensões características (a, b, c, D_g), volume (V), índices de contração (a/a_0 , b/b_0 e c/c_0), circularidade (C) e esfericidade (E) dos frutos de amendoim em função do teor de água.

Teor de água (b.s.)	Dimensões características (mm)				Volume mm^3	a/a_0	b/b_0	c/c_0	C (%)	E (%)
	a	b	c	D_g						
0,63	32,67	14,82	14,03	18,94	3556,78	1,00	1,00	1,00	45,36	57,97
0,49	32,50	14,64	13,81	18,73	3441,24	0,99	0,99	0,98	45,05	57,63
0,36	32,36	14,55	13,74	18,64	3389,09	0,99	0,98	0,98	44,96	57,59
0,26	32,21	14,45	13,71	18,54	3338,71	0,99	0,97	0,98	44,86	57,58
0,17	31,93	14,23	13,62	18,36	3239,87	0,98	0,96	0,97	44,57	57,50
0,10	31,59	14,03	13,52	18,16	3135,84	0,97	0,95	0,96	44,40	57,49
0,03	31,45	13,93	13,46	18,07	3088,99	0,96	0,94	0,96	44,29	57,45

No Quadro 3 também é possível verificar que, os frutos de amendoim, em média, apresentaram maior redução no índice de contração da sua largura (b) 6%, quando comparamos com o comprimento (a) e espessura (c), ambas com 4%, isso com o teor de água do produto variando de 0,63 a 0,04 decimal b.s. A diferença entre os valores do índice de contração das dimensões características dos frutos e grãos de amendoim ocorreu devido à inversão da posição dos produtos no momento da medição, ou seja, o lado correspondente à dimensão b (largura) dos frutos é a mesma dimensão c (espessura) dos grãos. Além disso, pode-se afirmar que as magnitudes dos índices de contração das dimensões dos frutos de amendoim sofreram pequena influência em função da redução do teor de água, durante a secagem. Goneli et al. (2011) e Resende et al. (2005), também observaram comportamento semelhante aos encontrados no presente estudo.

Ainda no Quadro 3, observa-se pequena redução nos valores da circularidade e esfericidade em função da secagem dos frutos de amendoim. Estes resultados são explicados devido à contração uniforme das principais dimensões que compõe os frutos. Para as condições em que este trabalho foi desenvolvido e para faixa de teor de água estudada, a forma dos frutos praticamente não apresentou variabilidade.

Goneli et al. (2011), trabalhando com frutos de mamona também observaram resultados semelhantes, onde a circularidade e esfericidade apresentaram pequenas variações em seus valores. Tanto a circularidade como a esfericidade mantiveram seus valores abaixo de 60%, sendo que esses valores tornam os frutos de amendoim classificados como não circulares e não esféricos.

Na Figura 13, são encontrados os valores da área projetada dos frutos de amendoim, em função da redução do teor de água decimal b.s., durante a secagem.

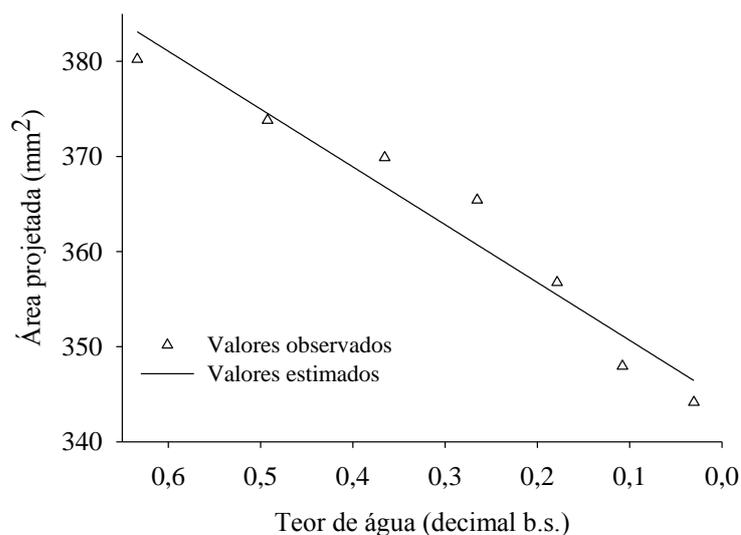


FIGURA 13. Valores observados e estimados da área projetada dos frutos de amendoim em função do teor de água.

Observa-se na Figura 13 que houve redução nos valores da área projetada dos frutos de amendoim com o decréscimo do teor de água. A redução dos valores da área projetada esteja relacionada com a redução do volume dos frutos de amendoim, ao longo do processo de secagem. Este fenômeno também foi observado por diversos autores (SIQUEIRA et al., 2012; GUEDES et al., 2011; GONELI et al., 2008; YALÇIN et al., 2007; AYDIN, 2007; COŞKUNER e KARABABA, 2007). Nota-se na Figura 13 que a área projetada dos frutos de amendoim variou de 380,21 a 344,16 mm², para a faixa de teor de água de 0,63 a 0,04 decimal b.s., respectivamente, fenômeno este sendo satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear simples (Quadro 4).

Apresentam-se na Figura 14, os valores observados e estimados da relação superfície/volume dos frutos de amendoim em função da secagem.

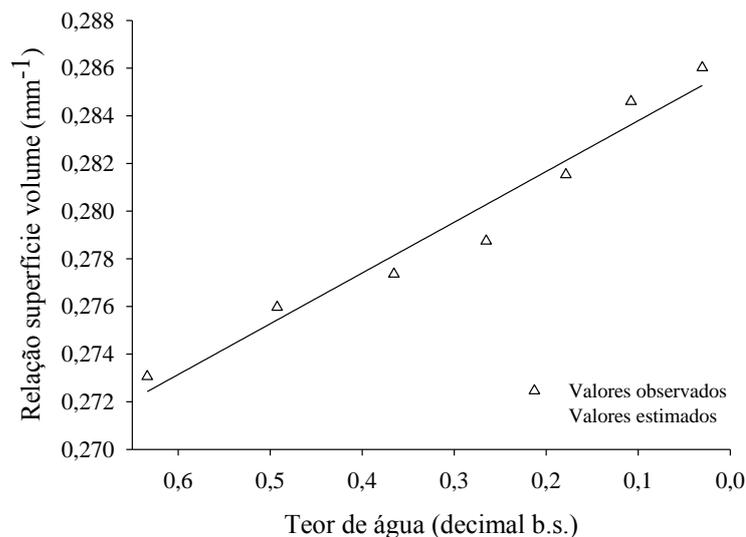


FIGURA 14. Relação superfície volume dos frutos de amendoim em função do teor de água em estudo.

Verifica-se na Figura 14 que, assim como nos grãos, os valores da relação superfície/volume dos frutos de amendoim, foram elevados ao reduzir o teor de água, durante o processo de secagem. Estes resultados assemelham-se aqueles observados por Siqueira et al. (2012), quando na ocasião trabalhavam com frutos de pinhão-manso. Analisando a Figura 14 observa-se que, o fenômeno em estudo pode ser satisfatoriamente representado por um modelo de regressão linear simples, onde sua equação é apresentada no Quadro 4. A relação superfície volume dos frutos de amendoim variou aproximadamente, 0,27 a 0,28 mm^{-1} , para a faixa de teor de 0,63 a 0,04 decimal b.s., respectivamente.

São apresentados na Figura 15, os valores observados e estimados da área superficial dos frutos de amendoim em função da secagem, utilizando modelos propostos por diferentes autores.

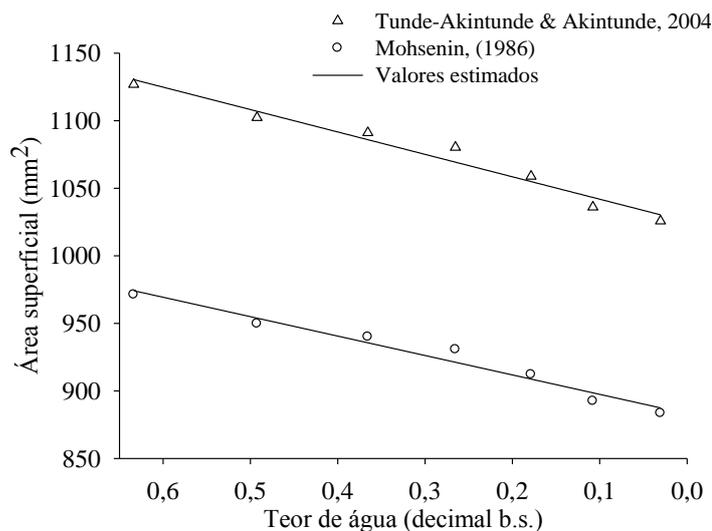


FIGURA 15. Valores observados e estimados da área superficial dos frutos de amendoim em função do teor de água.

Torna-se possível observar na Figura 15 que, em ambos os modelos utilizados, houve redução dos valores da área superficial dos frutos de amendoim com a redução do teor de água. Uma vez que a equação da superfície da esfera admite apenas o diâmetro médio como parâmetro para a obtenção dos valores da área superficial dos frutos de amendoim, torna-se duvidoso a precisão desses valores, devido à irregularidade e conformidade do produto. Sendo assim observa-se certa discrepância entre os valores dos modelos empregados, para uma mesma faixa de teor de água. Provavelmente este fenômeno esteja ligado ao fato de que, o modelo de Mohsenin (1986) apresenta ajustes matemáticos nas principais dimensões do produto, corroborando para valores próximos do real. Sendo que, independentemente da equação empregada, houve uma redução ao redor de 9% da área superficial dos frutos de amendoim, em relação aos seus valores iniciais. A redução dos valores da área superficial em função da redução do teor de água do produto também foi observada por diferentes autores (SIQUEIRA et al., 2012; GONELI et al., 2008; RAZAVI et al., 2007).

A relação entre a área superficial/massa dos frutos de amendoim determinado por meio de análise de regressão não linear, juntamente com os valores dos seus respectivos parâmetros estão apresentados no Quadro 4.

O modelo de representação da área superficial em função da massa dos frutos de amendoim foi satisfatório, apresentando valor elevado do coeficiente de determinação, assemelhando-se aos resultados encontrados por Goneli et al. (2008),

trabalhando com frutos de mamona. Assim, a partir desta relação torna-se possível estimar a área superficial dos frutos de amendoim, em mm^2 , a partir de dados de massa unitária, em gramas, dentro da faixa de teor de água estudada, permitindo uma maior facilidade para projetistas de equipamentos destinados à pós-colheita do produto que necessitem destas informações.

No Quadro 4, estão alocados os modelos ajustados aos dados observados para as diversas propriedades físicas estudadas dos frutos de amendoim, em função do teor de água decimal b.s., uma vez que estes modelos mostram-se adequados ao estimar as propriedades físicas dos frutos de amendoim, apresentando elevados valores do coeficiente de determinação (R^2), e significância satisfatória dos modelos.

QUADRO 4. Equações ajustadas aos valores das propriedades físicas dos frutos de amendoim em função do teor de água

Variável analisada	Modelo	R^2 (decimal)	F	P_{level}
Massa específica aparente	$\rho_a = 238,7430 + 91,3798 * M$	0,9745	191,4523	<0,0001
Massa específica unitária	$\rho_u = 610,0642 + 360,1568 * M$	0,9934	757,0493	<0,0001
Porosidade	$\varepsilon = 61,1113 + 5,6972 * M$	0,9480	91,1380	<0,0002
Massa de mil frutos	$M_{1000} = 1070,9538 + 956,1933 * M$	0,9822	440,8948	<0,0001
Área projetada	$A_p = 344,5888 + 60,7847 * M$	0,9470	89,3446	<0,0002
Área superficial*	$S = 1025,2980 + 165,8699 * M$	0,9659	141,6356	<0,0001
Área superficial**	$S = 883,0712 + 143,7282 * M$	0,9665	144,4021	<0,0001
Relação superfície/volume	$S / V = 0,2859 + (-0,0213 * M)$	0,9584	115,1690	<0,0001
Relação superfície/massa	$S / M = (770,3594 * W^{0,2133})$	0,9744	190,5769	<0,0001

¹Área superficial calculada pela Equação 10 (Tunde-Akintunde e Akintunde, 2004);

²Área superficial calculada pela Equação 7 (Mohsenin, 1986);

M = teor de água (decimal b.s.);

* Significância a 1%, teste t.

2.4 CONCLUSÕES

- A redução do teor de água proporcionou redução na massa específica aparente e unitária, na massa de mil grãos e frutos, na área projetada e na área superficial dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem.
- A porosidade dos grãos de amendoim aumenta com a redução do teor de água, enquanto que nos frutos reduz.
- As dimensões características dos grãos e frutos de amendoim reduziram com a redução do teor de água.
- A circularidade e a esfericidade dos frutos de amendoim reduz durante o processo de secagem, e também a esfericidade dos grãos, enquanto que a circularidade dos grãos de amendoim não apresenta tendência definida em seus valores com a redução do teor de água.
- A equação utilizada para representar a relação área superficial/massa pode ser aplicada em ambos os produtos.
- A relação superfície/volume dos grãos e frutos de amendoim aumenta com a redução do teor de água, durante o processo de secagem.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYDIN, C. Some engineering properties of peanut and kernel. **Journal of Food Engineering**, v.79, p. 810-816, 2007.

BANDE, Y.M.; ADAM, N.M.; AZNI, Y.; JAMAREI, O. Moisture-dependent physical and compression of bitter melon (*Citrullus colocynthis lanatus*) seeds. **International Journal of Agricultural Research**, v.7, n. 5, p. 243-254, 2012.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p. 395, 2009.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.665-670, 2006.

COŞKUNER, Y.; KARABABA, E. Physical properties of coriander seeds (*Coriandrum sativum* L.). **Journal of Food Engineering**, v.80, p.408-416, 2007.

DURŞUN, I.; TUĞRUL, K.M.; DURŞUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. **Journal of Stored Products Research**, v.43, p.149-155, 2007

FARINHA, L. R. L. Características físicas na perda da matéria fresca e evolução das propriedades reológicas e cor da cenoura cv. Brasília no armazenamento. **Dissertação Mestrado**. Viçosa: UFV, p.111, 2008.

FATHOLLAHZADEH H.; MOBILI H.; BEHESHTI B.; AFARA. J.; BORGHEI A.M. Effect of moisture content on some physical properties of Apricot kernel (C.V. Sonnati Salmas). **Agricultural Engineering International**. CIGR Ejournal. Manuscript FP 08 008. Vol. X. June, 2008.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-químicas e consumo em geradores de energia. **Química Nova**, v. 18, n. 01, p. 19-23, jan. 2005.

GARNAYAK D.K.; PRADHAN R.C.; NAIK S.N.; BHATNAGAR N. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 27, p. 123–129, 2008.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; SANTOS, E.S. Propriedades físicas dos frutos de mamona durante a secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 33, p. 148-155, 2008.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, p.1-8, 2011.

GUEDES, M.A.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M.; FARIAS, P.A.; NÓBREGA, A.M.M.C. Caracterização física de grãos de soja utilizando processamento digital de imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.3, p.277-292, 2011.

KARABABA, E. Physical properties of popcorn kernels. **Journal of Food Engineering**, v.72, p. 100-107, 2006.

KIBAR, H. Physical and mechanical properties of soybean. **International Agrophysics**, Lublin, Polônia v.22, p.239-244. 2008.

LANARO, N.D.; BAJAY, L.G.; QUEIROZ, V.M.P.; PINTO, R.C.S.; LEITÃO, I.G.A.; LESSIO B.C.; AUGUSTO P.E.D. Determinação de propriedades físicas do feijão fradinho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.1, p.27-35, 2011.

MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.1, p.79-93, 2002.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, London, v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004.

MILANI E.; SEYED M.; RAZAVI A.; KOOCHEKI A.; NIKZADEH V.; VAHEDI N.; MOEINFARM D.; GHOLAMHOSSEIN A. Moisture dependent physical properties of cucurbit seeds. **Int. Agrophysics**, v. 21, p. 157-168, 2007.

MOSHENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, p.841, 1986.

PAKSOY, M.; AYDIN, C. Some physical properties of edible squash (*Cucurbita pepo* L.) seeds. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.225-231, 2004.

RAZAVI, S.M.A.; EMADZADEH, B.; RAFE, A.; AMINI, A.M. The physical properties of pistachio nut and kernel as a function of moisture content and variety: Part I. Geometrical properties. **Journal of Food Engineering**, v.81, p.209-217, 2007.

REDDY, B.S.; CHAKRAVERTY, A. Physical properties of raw and parboiled paddy. **Biosystems Engineering**, v. 1, p. 461-466, 2004.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; CECOM, P.R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.7, p.15-24, 2005.

RIBEIRO, D.M.; CORRÊA, P.C.; RODRIGUES, D.H.; GONELI, A.L.D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.611-617, 2005.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem. **Global Science and Technology**. Rio Verde, v. 05, n. 01, p.83 – 92, 2012.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H; SOARES F.A.L. Forma e tamanho dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem em cinco condições de ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.16, n.8, p.864–870, 2012.

SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**, v.97, p.201-207, 2007.

TAVAKOLI M.; TAVAKOLI H.; RAJABIPOUR A.; AHMADI H. ZAHEDI S.M. T. G.; Moisture-dependent physical properties of barley grains. **Int J Agric & Biol Eng.**, v. 4 p.84–91, 2009.

TUNDE-AKINNTUNDE, T.Y.; AKINTUNDE, B.O. Some physical properties of sesame seed. **Biosystems Engineering**, v.88, p.127-129, 2004.

YALÇIN, İ.; ÖZARSLAN, C.; AKBAŞ, T. Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.731-735, 2007.

CAPÍTULO 3

CINÉTICA DA CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DOS FRUTOS E GRÃOS DE AMENDOIM DURANTE A SECAGEM

3.1. INTRODUÇÃO

Para aumentar a produção de oleaginosas e elevar a qualidade dos produtos agrícolas, devido às exigências impostas pelo mercado especializado, torna-se indispensável à procura por melhorias e otimização do processo produtivo. Uma etapa muito importante no ciclo produtivo, diz respeito à colheita e pós-colheita que, entre outras recomendações, pretende-se que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, visando minimizar as perdas ocasionadas no campo, por ataques de insetos e microorganismos. Devido ao teor de água elevado por ocasião da colheita, a secagem constitui uma das operações de primordial importância, uma vez que está diretamente relacionado com a qualidade do produto final e pode resultar em danos irreversíveis ao material vegetal (SIQUEIRA et al., 2012)

Uma das mudanças físicas mais importantes que ocorrem nos produtos agrícolas durante a secagem é a redução do seu volume. Segundo Resende et al. (2005), a redução do teor de água dos produtos agrícolas influencia diretamente as propriedades físicas, provocando redução no volume do produto, fenômeno este conhecido como contração volumétrica. Para melhor entendimento deste fenômeno, avalia-se o índice de contração volumétrica, que é a relação entre o volume para diferentes teores de água durante o processo de secagem e o volume inicial do produto. Esse tipo de informação é de extrema importância, pois é possível prever o comportamento do volume dos produtos agrícolas de acordo com a redução do seu teor de água.

Para um completo entendimento do processo de secagem de materiais vegetais, o estudo e simulação matemática durante a secagem de diversos produtos agrícolas têm sido avaliado, na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante este processo. Resende et al. (2010), observaram que a simulação de secagem, além de proporcionar informações teóricas sobre o comportamento de cada produto durante a remoção de água, pode também ser útil no desenvolvimento e aperfeiçoamento de máquinas utilizadas no processamento dos grãos ou sementes após a colheita. Para a simulação, que envolve a secagem de sucessivas camadas finas do

produto, um modelo matemático é usado no intuito de representar de forma satisfatória a perda de água durante a fase de secagem (GINER e MASCHERONI, 2002).

Na literatura muitos autores relataram que apesar da importância da contração volumétrica, este fenômeno é muitas vezes negligenciado durante o desenvolvimento de modelos de secagem (BENAMOUN e BELHAMRI, 2006; RAMOS et al., 2005). Normalmente, a compreensão das bases teóricas do processo de contração volumétrica envolve o conhecimento de complexas leis mecânicas e deformação de materiais. Devido a esta complexidade, a maioria dos pesquisadores utilizam modelos empíricos ou aproximações, no intuito de melhorar este complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (MAYOR e SERENO, 2004).

O entendimento dos fenômenos que envolvem a contração volumétrica de grãos ou frutos, durante o processo de secagem, é importante para estimar os níveis de tensão, que o produto é submetido, em função do gradiente de temperatura e umidade (OLIVEIRA et al., 2011). Estes mesmos autores afirmam que a redução excessiva de água pode causar danos à estrutura celular do produto, levando à mudança na forma e no decréscimo em suas dimensões.

A variação das propriedades físicas dos produtos agrícolas, como a contração volumétrica, durante o processo de secagem, tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores (SIQUEIRA et al., 2012; CORRÊA et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2011; GONELI et al., 2011 e KOÇ et al., 2008). Onde na maioria dos trabalhos, o fenômeno da contração volumétrica é correlacionado com fatores como o teor de água do produto, umidade relativa, temperatura e velocidade do ar de secagem. Em contrapartida, trabalhos correlacionando alterações volumétricas com o fator tempo de secagem, ainda não acompanham as tradicionais relações. Afonso Júnior et al. (2004) e alguns pesquisadores, afirmam que todos estes fatores atuam juntos no produto, de forma dinâmica, e que o fenômeno de contração volumétrica será melhor compreendido se todas estas variáveis forem levadas em consideração.

Pesquisas envolvendo períodos de secagem são capazes de fornecer informações importantes sobre as propriedades termodinâmicas de produtos vegetais, que são bastante relevantes quanto aos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos (CORRÊA et al., 2010). Dentre estes fenômenos, a contração volumétrica possui importância significativa. As funções termodinâmicas utilizadas para avaliar o comportamento dos sistemas biológicos incluem a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs, sendo que estas propriedades termodinâmicas são necessárias no

requerimento de energia durante o encolhimento dos produtos agrícolas, além de prever os parâmetros dos fenômenos cinéticos de secagem. A entalpia está ligada a interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante a secagem, enquanto a entropia associa-se ao grau de ordem ou desordem existente no sistema água-produto (MCMINNET et al., 2005).

O estudo referente à entalpia e a entropia pode proporcionar informações sobre a energia livre de Gibbs, a qual pode servir como um indicativo da afinidade do produto pela água, fornecendo um critério de avaliação da desorção deste fluido. Telis et al. (2000) admitem que para os valores de energia livre de Gibbs negativos, o processo torna-se espontâneo, enquanto que para os valores positivos este processo é não-espontâneo. Dessa forma o processo entrará em equilíbrio quando o gradiente de energia livre de Gibbs for zero (NAYAK e PANDEY, 2000).

Dada a importância do cultivo do amendoim como uma oleaginosa e da falta de informação sobre o comportamento dos frutos e grãos desta cultura durante o processo de secagem, o objetivo deste trabalho foi testar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de contração volumétrica e identificar o melhor modelo para representar o fenômeno, além de fornecer informações sobre a cinética da contração volumétrica em diferentes níveis de temperatura, e as principais propriedades termodinâmicas ocorridas durante o processo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades Físicas de Produtos Agrícolas da Faculdade de Ciências Agrárias, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados, MS.

Os frutos de amendoim foram colhidos manualmente, com posterior seleção dos produtos, a fim de retirar todos àqueles defeituosos, evitando influências externas nos resultados. Posteriormente, os frutos foram debulhados para a retirada dos grãos, seguindo o mesmo critério de seleção. Inicialmente, os frutos apresentaram teores de água próximos a 0,63 decimal b.s., e os grãos apresentaram um teor de água de aproximadamente 0,59 decimal b.s. Os teores de água dos produtos foram determinados pelo método gravimétrico em estufa, a $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 24h, em duas repetições (Brasil, 2009).

A secagem dos produtos em camada delgada foi realizada para diferentes condições controladas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), e respectivas umidades relativas (19, 12, 7 e 6%). Foram colocadas no interior do equipamento, para cada tratamento, duas bandejas metálicas com diâmetro de 30 cm, contendo fundo telado para permitir a passagem do ar através da camada delgada do produto. A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas com o auxílio de três psicrômetro instalados no ambiente onde a estufa se encontrava.

A redução do teor de água dos grãos e frutos de amendoim durante a secagem foi acompanhada com o uso de uma balança com resolução de 0,01g pelo método gravimétrico. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, onde o espaçamento entre as leituras foi controlado pela diferença de massa entre uma leitura e outra (conhecendo-se o teor de água inicial), evitando diferenças elevadas de teor de água entre as leituras. O teor de água final para leitura das dimensões características do produto e determinação do volume da massa, para fins de modelagem matemática, variou, para grãos e frutos de amendoim, entre 0,05 e 0,10 decimal b.s., respectivamente. Para o acompanhamento da redução do volume da massa durante cada medição, o produto foi transferido para uma proveta de vidro graduada com a capacidade de 1 litro para os grãos e de 2 litros para os frutos.

O índice de contração volumétrica da massa e unitária de grãos e frutos de amendoim, durante a secagem, foi determinado pela relação entre o volume para cada teor de água (V) e o volume inicial (V_0), como mostra a seguir:

$$\Psi = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

em que:

Ψ : índice de contração volumétrica, decimal;

V : volume em cada teor de água, m^3 ; e

V_0 : volume inicial, m^3 .

Para a determinação do volume, os grãos e frutos de amendoim foram considerados como esferóides triaxiais, tendo a medida dos eixos ortogonais comprimento (a), largura (b) e espessura (c) determinadas com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, como ilustrado na Figura 1.

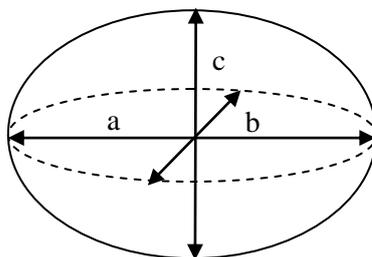


FIGURA 1. Desenho esquemático dos grãos e frutos do amendoim, considerado um esferoide triaxial, com suas dimensões características.

A determinação do volume (V_g) para cada teor de água do produto foi baseado no uso da Equação 2 (MOHSENIN, 1986), mostrada a seguir:

$$V_g = \frac{\pi(a b c)}{6} \quad (2)$$

em que:

a: comprimento, mm;

b: largura, mm; e

c: espessura, mm.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos e frutos de amendoim foram ajustados os modelos matemáticos descritos pelas expressões listadas no Quadro 1.

QUADRO 1. Modelos utilizados para modelar o índice de contração volumétrica dos grãos e frutos de amendoim.

Designação do modelo	modelo	
Bala e Woods modificado (1984)	$\psi = 1 - a_1 \left\{ 1 - \exp \left[-a_2 (X_0 - X) \right] \right\}$	(3)
Linear	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X$	(4)
Exponential	$\psi = a_1 \cdot \exp(b \cdot X)$	(5)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / \left[a_1 + b \cdot \exp(X) \right]$	(6)
Polinomial	$\psi = a_1 + a_2 \cdot X + a_3 \cdot X^2$	(7)
Rahman	$\psi = 1 + a_1 (X - X_0)$	(8)

em que:

a_1, a_2, a_3 : parâmetros dependentes do produto;

X: teor de água, decimal b.s.; e

X_0 : teor de água inicial, decimal b.s.

3.2.1. Cinética da contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim

A variação do volume em relação ao tempo foi descrita pela analogia à lei de resfriamento de Newton, que é baseada na transferência de calor por convecção. Assume-se que para cada tempo de secagem, um teor de água é correlacionado com o teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio, isso para condições específicas de secagem. Desta forma, os valores de razão de umidade em função do tempo são

ajustados aos modelos matemáticos durante o processo de secagem de produtos agrícolas, podendo ser descritos da seguinte forma:

$$RU = \frac{U^* - U_e^*}{U_i^* - U_e^*} = \exp(-k_s t) \quad (9)$$

em que:

- RU : razão de umidade do produto, adimensional;
- U^* : teor de água do produto, decimal b.s.;
- U_e^* : teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.;
- U_i^* : teor de água inicial do produto, decimal b.s.;
- k_s : constante de secagem, h^{-1} ; e
- t : tempo, h.

Considerando que as propriedades físicas dos grãos e frutos do amendoim apresentam uma relação com o teor de água, torna-se aceitável supor que as mudanças nas dimensões dos produtos e, conseqüentemente nos seus volumes, devido à secagem, devam comporta-se de maneira semelhante ao representado pela Equação 9, (LESPINARD et al., 2009):

$$TRV = \frac{V - V_e}{V_0 - V_e} = \exp(-k.t) \quad (10)$$

em que:

- TRV : taxa de redução do volume, adimensional;
- V : volume do produto, cm^3 ;
- V_e : volume de equilíbrio do produto, cm^3 ;
- V_0 : volume inicial do produto, cm^3 ; e
- k : constante de variação do volume com o tempo, h^{-1} .

O volume de equilíbrio (V_e) foi alcançado quando não havia mais mudanças de volume após três pesagens consecutivas.

3.2.2. Efeito da temperatura

Para avaliar a influência da temperatura sobre a constante de variação do volume com o tempo (k), foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita da seguinte forma:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (11)$$

em que:

- k : constante de variação do volume com o tempo, h^{-1} ;
- k_0 : fator pré-exponencial;
- E_a : energia de ativação, $kJ\ mol^{-1}$;
- R : constante universal dos gases, $8,314\ kJ\ kmol^{-1}\ K^{-1}$; e
- T_a : temperatura absoluta, K .

Para a análise das propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs) relacionadas à taxa de redução do volume dos grãos e frutos de amendoim, foi utilizado o método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009), de acordo com as seguintes equações:

$$\Delta h = E_a - RT \quad (12)$$

$$\Delta s = R \left(\ln k_0 - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (13)$$

$$\Delta G = \Delta h - T\Delta s \quad (14)$$

em que:

- Δh : entalpia específica, $J\ mol^{-1}$;
- Δs : entropia específica, $J\ mol^{-1}$;
- ΔG : energia livre de Gibbs, $J\ mol^{-1}$;
- k_B : constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}\ JK^{-1}$; e
- h_p : constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34}\ Js^{-1}$.

3.2.3. Análise estatística

Para análise do grau de ajuste de cada modelo utilizado no estudo da contração volumétrica unitária e da massa dos grãos e frutos de amendoim, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P), desvio padrão da estimativa (SE), utilizando a análise de regressão não linear, com o auxílio do programa computacional STATISTICA 7.0[®], além da verificação do comportamento da distribuição dos resíduos, que são a diferença entre os valores observados experimentalmente, pelos valores estimados pelos modelos. Um modelo é considerado aceitável se os valores dos resíduos se encontrarem próximos à faixa horizontal em torno de zero, indicando que os resultados não são tendenciosos. Se as distribuições dos resíduos formam figuras geométricas ou tendem a se acumular em um ponto fora do eixo, a distribuição dos seus resíduos é considerada como tendenciosa e o modelo inadequado para representar o fenômeno em questão (GONELI et al., 2011).

Valores do erro médio relativo menores que 10% foram considerados como critérios para a seleção de modelos, de acordo com a Mohapatra e Rao (2005). O erro médio relativo, o desvio padrão da estimativa para cada modelo foi calculado em conformidade com as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (15)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (16)$$

em que:

n : número de observações experimentais;

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor calculado pelo modelo; e

GLR : graus de liberdade do modelo.

Para análise estatística do modelo utilizado para descrever a cinética de contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2) e do desvio padrão da estimativa (SE).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3, são apresentados, respectivamente, os valores experimentais da redução do volume dos grãos e frutos de amendoim. Nestas figuras, o encolhimento dos produtos é representado pelos valores experimentais em função do teor de água, para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C.

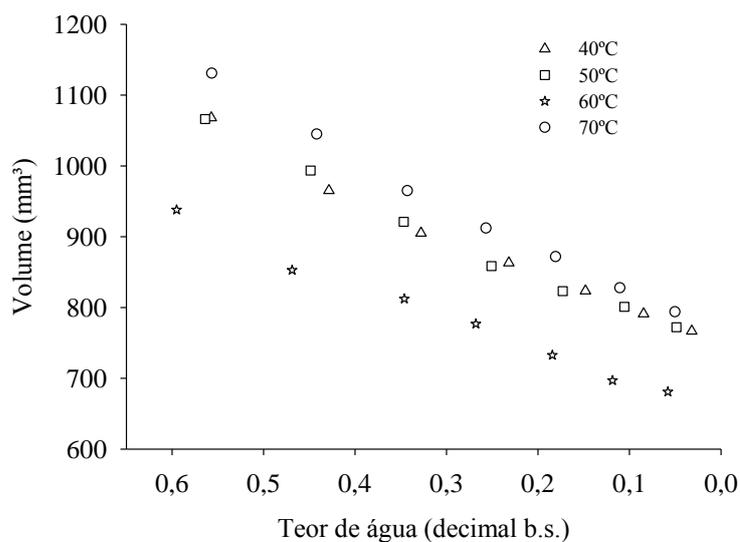


FIGURA 2. Valores observados da redução do volume dos grãos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

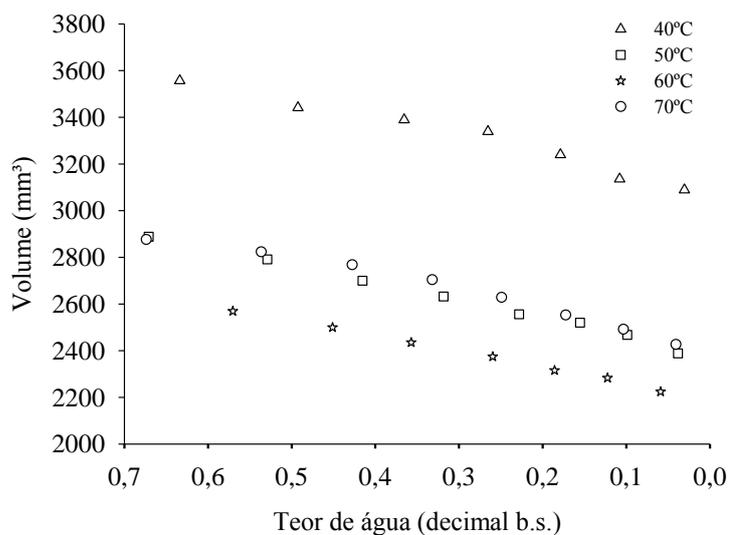


FIGURA 3. Valores observados da redução do volume dos frutos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

Podemos observar nas Figuras 2 e 3 que durante a redução do teor de água, ocorreu redução do volume dos grãos e frutos de amendoim em relação ao volume inicial. Observa-se ainda nestas figuras que os grãos assumem um encolhimento mais acentuado em suas dimensões quando comparado à redução do volume dos frutos de amendoim, independentemente da temperatura do ar de secagem. Este fenômeno ocorre devido à diferença de composição físico-química entre os produtos, uma vez que os frutos possuem cascas com elevada quantidade de fibras, que durante a secagem contrai numa proporção relativamente menor, em comparação a contração dos grãos de amendoim. Siqueira et al. (2012), trabalhando com frutos de pinhão-manso também encontram resultados semelhantes aqueles encontrado no presente trabalho, onde o aumento da temperatura do ar de secagem não influenciou na taxa redução do volume do produto.

3.3.1. Contração volumétrica da massa dos grãos e frutos de amendoim

Podemos observar no Quadro 2, valores dos parâmetros estatísticos utilizados na comparação entre os seis modelos ajustados aos dados experimentais da contração volumétrica da massa dos grãos de amendoim, em diferentes condições de secagem, sendo estes parâmetros o desvio padrão da estimativa (SE), o erro médio relativo (P), o coeficiente de determinação (R^2) e a distribuição dos resíduos, respectivamente.

Observa-se que, todos os modelos utilizados para descrever a contração volumétrica da massa de grãos de amendoim apresentaram reduzidos valores do desvio padrão da estimativa e do erro médio relativo, além de elevados valores dos coeficientes de determinação, em todas as condições do ar de secagem (Quadro 2). Os modelos de Bala e Woods modificado (1984) e Polinomial de segundo grau apresentaram as menores magnitudes do desvio padrão da estimativa, do erro médio relativo e os maiores valores do coeficiente de determinação, quando comparados aos demais modelos (Quadro 2). Além disso, nota-se no Quadro 2 que entre os modelos estudados, apenas os modelos de Bala e Woods modificado (1984) e Polinomial de segundo grau apresentaram tendência aleatória de distribuição dos resíduos para todas as temperaturas estudadas. Dessa forma, estes modelos podem representar satisfatoriamente o fenômeno da contração volumétrica da massa de grãos de amendoim.

QUADRO 2. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica da massa dos grãos de amendoim

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0052	0,4160	0,9978	A	0,0080	0,6538	0,9942	A
(4)	0,0246	2,4705	0,9527	T	0,0242	2,2072	0,9485	T
(5)	0,0190	1,9573	0,9718	T	0,0195	1,7827	0,9666	T
(6)	0,0066	0,6383	0,9965	A	0,0093	0,8565	0,9924	A
(7)	0,0045	0,3250	0,9987	A	0,0061	0,4184	0,9973	A
(8)	0,0277	2,9474	0,9284	T	0,0260	2,5939	0,9286	T

Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0032	0,2613	0,9990	A	0,0041	0,2899	0,9983	A
(4)	0,0246	2,2934	0,9448	T	0,0261	2,3326	0,9337	T
(5)	0,0201	1,8981	0,9633	T	0,0219	1,9819	0,9532	T
(6)	0,0077	0,7120	0,9946	A	0,0102	0,8735	0,9897	T
(7)	0,0064	0,5740	0,9970	A	0,0047	0,3617	0,9982	A
(8)	0,0291	2,8861	0,9073	T	0,0299	2,8921	0,8955	T

A= aleatório, T= tendencioso.

Corrêa et al. (2006), apontaram o modelo de Bala e Woods modificado (1984) como o único a representar satisfatoriamente a contração volumétrica da massa de grãos de trigo. Porém, devido a sua simplicidade e fácil execução computacional, quando comparado ao modelo de Bala e Woods modificado (1984), o modelo Polinomial de segundo grau foi o escolhido para representar a contração volumétrica da massa de grãos de amendoim. Afonso Júnior et al. (2003), utilizaram o modelo Polinomial de segundo grau para representar a contração volumétrica de diferentes variedades de café.

No Quadro 3 são apresentados os parâmetros do modelo Polinomial de segundo grau (Equação 7) ajustados aos dados experimentais, durante a contração volumétrica massa dos grãos de amendoim, em todas as condições do ar de secagem.

QUADRO 3. Parâmetros do modelo polinomial de segundo grau para diferentes temperaturas de secagem, da contração volumétrica da massa dos grãos de amendoim.

Temperatura (°C)	a ₁	a ₂	a ₃
40	0,7087	0,0694	0,7218
50	0,7329	0,0633	0,6508
60	0,7319	-0,0063	0,7367
70	0,7494	-0,0358	0,7639

Verifica-se no Quadro 3 que, apenas o parâmetro a_2 sofreu redução em suas magnitudes, com o incremento da temperatura do ar de secagem. No que diz respeito aos parâmetros a_1 e a_3 do modelo Polinomial de segundo grau, pode-se observar que seus valores não tiveram nenhuma tendência definida correlacionada com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Na Figura 4, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo Polinomial de segundo grau, do índice de contração volumétrica da massa dos grãos de amendoim em função do teor de água.

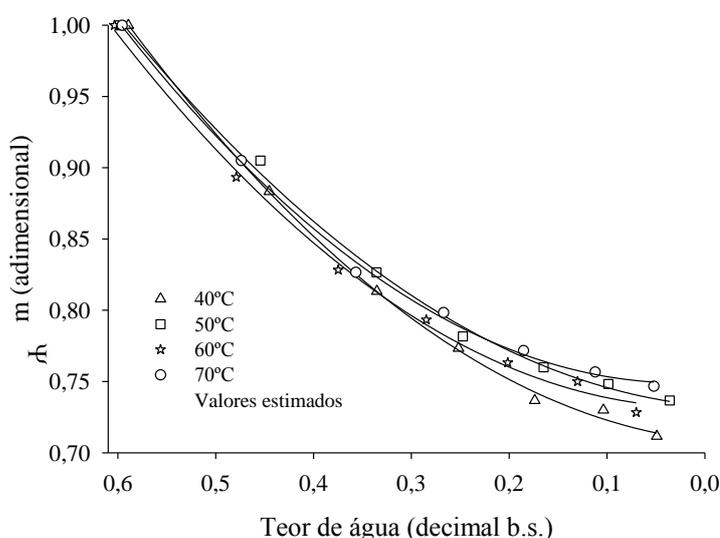


FIGURA 4. Valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, da contração volumétrica da massa dos grãos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

Como pode ser observado na Figura 4, o aumento da temperatura do ar não exerceu influência significativa no encolhimento da massa dos grãos de amendoim durante o processo de secagem. Constatando-se, por este comportamento, que a redução do volume da massa de grãos de amendoim, quando submetido à secagem está diretamente relacionado com o teor de água do produto. Mesmo o parâmetro a_2 , do modelo Polinomial de segundo grau ter sofrido influência em suas magnitudes com o aumento da temperatura, este comportamento não transpareceu da Figura 4. Ribeiro et al. (2005), trabalhando com grãos de soja, admitiram que a redução do teor de água reduziu o índice de contração volumétrica da massa do produto. Resende et al. (2005), observaram redução na contração volumétrica da massa dos grãos de feijão com o decréscimo do teor de água, durante o processo de secagem.

No Quadro 4, são apresentadas as magnitudes dos parâmetros utilizados na análise estatística da contração volumétrica da massa de frutos de amendoim. Sendo estes parâmetros o desvio padrão da estimativa (SE), o erro médio relativo (P), os coeficientes de determinação (R^2), e a tendência da distribuição de resíduos dos modelos, em diferentes temperaturas do ar de secagem.

QUADRO 4. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	Resíduo
(3)	0,0139	1,1060	0,9393	A	0,0104	0,8005	0,9665	A
(4)	0,0138	1,1193	0,9409	A	0,0107	0,8779	0,9646	A
(5)	0,0145	1,2095	0,9340	A	0,0105	0,8563	0,9662	A
(6)	0,0190	1,6469	0,8872	T	0,0112	0,9406	0,9609	A
(7)	0,0116	0,8941	0,9650	A	0,0114	0,8385	0,9666	A
(8)	0,0129	1,1059	0,9393	T	0,0107	0,8675	0,9590	A
Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)	Resíduo
(3)	0,0109	0,8361	0,9683	A	0,0075	0,5553	0,9838	A
(4)	0,0102	0,8427	0,9718	A	0,0079	0,5748	0,9821	A
(5)	0,0102	0,8417	0,9720	A	0,0074	0,5776	0,9842	A
(6)	0,0123	0,9682	0,9596	T	0,0087	0,6811	0,9787	T
(7)	0,0112	0,8397	0,9720	A	0,0080	0,5833	0,9849	A
(8)	0,0110	0,8941	0,9622	T	0,0092	0,6369	0,9716	T

De acordo com os dados apresentados no Quadro 4, observa-se que dos sete modelos avaliados, apenas os modelos propostos por Corrêa et al. (2004) e Rahmam não apresentaram distribuição aleatória dos seus resíduos em todas as temperatura do ar secagem, sendo esta implicância um dos parâmetros pré-estabelecidos para a escolha do melhor modelo. Em contrapartida, os demais modelos, além de apresentar distribuição aleatória dos resíduos, apresentaram valores elevados do coeficiente de determinação, reduzidos valores do desvio padrão da estimativa e do erro médio relativo, nos diferentes níveis de temperatura. Sendo assim, estes modelos podem ser utilizados para a representação do fenômeno da contração volumétrica da massa de frutos de amendoim. Goneli et al. (2011), utilizaram o modelo Polinomial de segundo grau para descrever o fenômeno da contração volumétrica da massa dos frutos de mamona.

Por apresentar maior simplicidade e facilidade de interpretação dos seus parâmetros, além de corresponder a todos os pré-requisitos necessários para a escolha do melhor modelo que pudesse representar satisfatoriamente o fenômeno da contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim, o modelo Linear foi o indicado e utilizado no presente estudo. Resultados semelhante a este foi observado por Ribeiro et al. (2005), onde o modelo Linear representou satisfatoriamente a contração volumétrica da massa de semente de soja.

No Quadro 5 são apresentados os parâmetros do modelo Linear (Equação 4) ajustados aos dados experimentais, durante a contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim, em todas as temperaturas do ar de secagem.

QUADRO 5. Parâmetros do modelo linear para diferentes temperaturas de secagem, da contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	a ₁	a ₂
40	0,8517	0,2113
50	0,8256	0,2085
60	0,8041	0,2258
70	0,8130	0,2246

Observa-se no Quadro 5 que, tanto o parâmetro a₁ como o parâmetro a₂ do modelo Linear, não apresentaram uma linha de tendência de forma proporcional ao aumento da temperatura do ar de secagem. Provavelmente este tipo de comportamento observado nos valores dos parâmetros do modelo Linear, ocorra devido aos ajustes matemáticos realizados durante a modelagem dos dados experimentais.

Na Figura 5, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo Linear, da contração volumétrica da massa de frutos de amendoim em função do teor de água, para todas as temperaturas do ar de secagem.

Nas condições em que este trabalho foi conduzido, podemos observar que o aumento da temperatura do ar de secagem foi incapaz de apresentar consideráveis diferenças na contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim ao longo do processo de secagem (Figura 5). Este comportamento provavelmente esteja relacionado com a invariabilidade dos parâmetros do modelo Linear em função do aumento da temperatura.

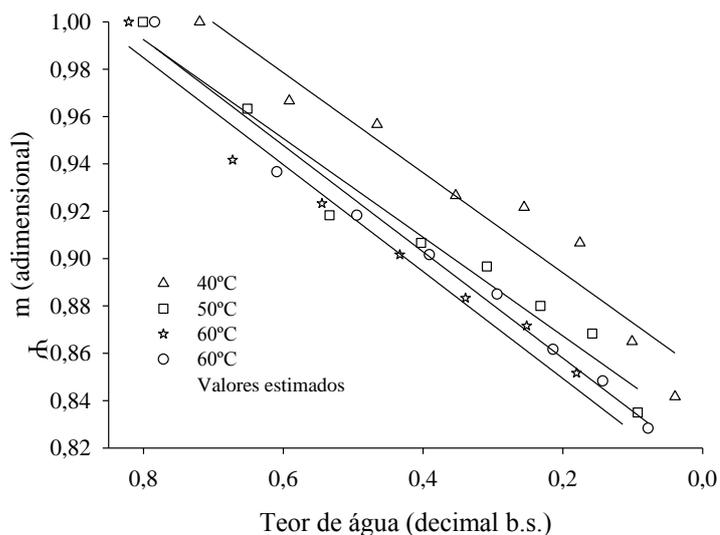


FIGURA 5. Valores observados e estimados, pelo modelo Linear, da contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

Observa-se também na Figura 5, que o efeito do encolhimento da massa de frutos do amendoim está diretamente relacionado com teor de água do produto. Goneli et al. (2011), também verificaram que a redução do teor de água influencia a contração volumétrica da massa dos frutos de mamona. O mesmo comportamento foi observado por Corrêa et al. (2006), trabalhando com grãos de trigo.

3.3.2. Contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim

No Quadro 6, são apresentados os valores dos parâmetros utilizados no estudo da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim, tais como: desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P), os coeficientes de determinação (R^2), e a tendência da distribuição de resíduos dos modelos, em diferentes condições de temperatura.

Como pode ser observado no Quadro 6, todos os modelos analisados apresentaram valores reduzidos do desvio padrão da estimativa, em todas as temperaturas estudadas, assim, a avaliação de outros parâmetros, tais como o erro médio relativo, o coeficiente de determinação e a distribuição residual dos valores, são necessários na escolha do modelo que descreva satisfatoriamente o fenômeno da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim. Ainda no Quadro 6, note-se valores reduzidos do erro médio relativo para todos os modelos matemáticos em todas as temperaturas estudadas, onde destaca-se os modelos de Bala e Woods modificado

(1984) e o Polinomial de segundo grau por apresentarem os menores valores do erro médio relativo. De acordo com Mohapatra e Rao (2005), valores do erro médio relativo inferiores a 10% indicam a representação adequada do fenômeno.

QUADRO 6. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0050	0,4535	0,9971	A	0,0059	0,4680	0,9971	A
(4)	0,0127	1,0382	0,9864	T	0,0119	1,1511	0,9886	T
(5)	0,0083	0,6619	0,9941	T	0,0077	0,7322	0,9952	T
(6)	0,0075	0,6960	0,9952	T	0,0105	0,8275	0,9911	T
(7)	0,0062	0,5255	0,9973	A	0,0059	0,4551	0,9977	A
(8)	0,0153	1,3462	0,9763	T	0,0121	1,1969	0,9858	T
Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0092	0,6881	0,9925	A	0,0032	0,2627	0,9992	A
(4)	0,0099	0,7785	0,9913	A	0,0088	0,7177	0,9943	T
(5)	0,0088	0,7259	0,9931	A	0,0039	0,3389	0,9988	A
(6)	0,0152	1,3730	0,9795	T	0,0125	1,1987	0,9885	T
(7)	0,0099	0,7298	0,9930	A	0,0036	0,2773	0,9992	A
(8)	0,0109	0,7515	0,9874	A	0,0097	0,8704	0,9917	T

A= aleatório, T= tendencioso.

De acordo com o Quadro 6, os modelos de Bala e Woods modificado (1984) e Polinomial de segundo grau apresentaram os maiores valores do coeficiente de determinação, além disso, somente estes modelos apresentaram distribuição aleatória dos seus resíduos em todas as temperaturas estudadas. Corrêa et al. (2011) também verificaram que o modelo de Bala e Woods modificado (1984) foi o que melhor representou a contração volumétrica dos grãos de feijão vermelho durante a secagem.

No presente estudo, somente os modelos de Bala e Woods modificado (1984) e o Polinomial atenderam aos parâmetros pré-estabelecidos para a escolha do modelo capaz de representar satisfatoriamente o fenômeno da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim, durante a secagem. Por ser um modelo relativamente simples, principalmente quando comparado ao modelo de Bala e Woods modificado (1984), o modelo Polinomial de segundo grau foi o escolhido para representação do fenômeno em questão. Siqueira et al. (2012), trabalhando com sementes de pinhão-

manso também encontraram resultados semelhantes, onde os modelo Polinomial de segundo grau foi o que melhor se ajustou aos dados observados.

Apresenta-se no Quadro 7, os parâmetros do modelo Polinomial de segundo grau (Equação 7) ajustados aos dados observados durante a contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim, em todas as temperaturas do ar de secagem.

QUADRO 7. Parâmetros do modelo polinomial de segundo grau para diferentes temperaturas de secagem, na contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim.

Temperatura (°C)	a_1	a_2	a_3
40	0,7111	0,3091	0,3631
50	0,7077	0,3255	0,3533
60	0,7004	0,4147	0,1329
70	0,6823	0,4164	0,2784

Nota-se no Quadro 7 que, o aumento da temperatura do ar de secagem, apresentou influência sobre valores dos parâmetros a_1 e a_2 do modelo Polinomial de segundo grau, onde o parâmetro a_1 apresentou redução em sua magnitudes, enquanto o parâmetro a_2 apresentou elevação dos seus valores proporcionalmente ao aumento da temperatura. Quanto ao parâmetro a_3 observa-se que a variação da temperatura não exerceu influência definida sobre seus valores.

Na Figura 6, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo Polinomial de segundo grau, da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim em função do teor de água.

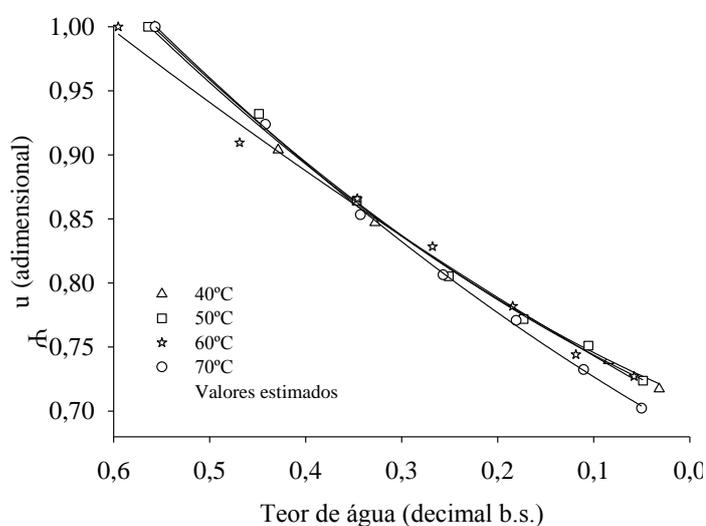


FIGURA 6. Valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

Observa-se na Figura 6 que os valores da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim decrescem com a redução do teor de água do produto, e o encolhimento volumétrico dos grãos é independente das condições da temperatura do ar de secagem. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores com diferentes produtos agrícolas (SIQUEIRA et al., 2012; CORRÊA et al., 2006; RIBEIRO et al., 2005; e RESENDE et al., 2005).

No Quadro 8, estão apresentados os valores do desvio padrão da estimativa (SE), do erro médio relativo (P), dos coeficientes de determinação, seguido da tendência de distribuição dos resíduos para os modelos utilizados para avaliar a contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim, em todas as temperaturas do ar de secagem.

QUADRO 8. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim

Modelos	40°C				50°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0095	0,7396	0,9657	T	0,0050	0,3598	0,9937	A
(4)	0,0092	0,7715	0,9682	T	0,0047	0,3500	0,9945	A
(5)	0,0099	0,8397	0,9629	T	0,0057	0,4399	0,9916	A
(6)	0,0142	1,1675	0,9243	T	0,0120	0,9927	0,9911	T
(7)	0,0073	0,4912	0,9837	A	0,0042	0,3161	0,9962	A
(8)	0,0087	0,7395	0,9657	T	0,0046	0,3597	0,9937	T
Modelos	60°C				70°C			
	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo	SE (decimal)	P (%)	R ² (decimal)	Resíduo
(3)	0,0043	0,3482	0,9947	A	0,0135	1,0682	0,9507	T
(4)	0,0035	0,2988	0,9965	A	0,0105	0,8225	0,9703	T
(5)	0,0048	0,3938	0,9934	A	0,0119	0,9537	0,9614	T
(6)	0,0114	0,9582	0,9629	T	0,0186	1,5562	0,9055	T
(7)	0,0019	0,1318	0,9991	A	0,0019	0,1300	0,9992	A
(8)	0,0040	0,3480	0,9947	T	0,0125	1,0681	0,9507	T

A= aleatório, T= tendencioso.

Podemos observar no Quadro 8 que apesar de todos os modelos recomendados apresentarem valores reduzidos do desvio padrão da estimativa, do erro médio relativo, e elevados valores do coeficiente de determinação, apenas o modelo

Polinomial de segundo grau apresentou distribuição aleatória dos resíduos, em todas as condições do ar de secagem. Dessa forma, o modelo Polinomial de segundo grau pode representar satisfatoriamente o fenômeno da contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim, uma vez que, foi este modelo o único atender a todas as exigências necessárias que favorecesse a sua indicação. O mesmo modelo matemático também foi indicado por Goneli et al. (2011), quando na ocasião avaliava o comportamento da contração volumétrica unitária dos frutos de mamona.

Encontram-se no Quadro 9 os valores dos parâmetros pertencentes ao modelo Polinomial de segundo grau, utilizados no ajuste dos dados observados da contração volumétrica unitárias dos frutos de amendoim, juntamente com as temperaturas do ar de secagem em estudo (40, 50, 60 e 70°C).

QUADRO 9. Parâmetros do modelo polinomial de segundo grau para diferentes temperaturas de secagem, na contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	a ₁	a ₂	a ₃
40	0,8573	0,3177	-0,1552
50	0,8209	0,3070	-0,0611
60	0,8258	0,2946	-0,0674
70	0,8252	0,4194	-0,2369

De acordo com o Quadro 9, observa-se que o parâmetro a₁ do modelo Polinomial de segundo grau foi o único a sofrer tendência definida em seus valores, ocorrendo redução gradativa em suas magnitudes com o acréscimo da temperatura do ar de secagem. Quanto aos parâmetros a₂ e a₃ do modelo Polinomial de segundo grau, verificou-se que ambos não sofreram influência do aumento da temperatura em suas magnitudes. Siqueira et al. (2012), observaram resultados semelhantes aos do presente estudo, onde não observaram a influência do aumento da temperatura sobre a tendência dos valores dos parâmetros a₂ e a₃ do modelo Polinomial de segundo grau, quando avaliaram o comportamento da contração volumétrica das sementes de pinhão-manso.

Na Figura 7, são apresentados os valores observados e estimados, pelo modelo Polinomial de segundo grau, da contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim em função do teor de água.

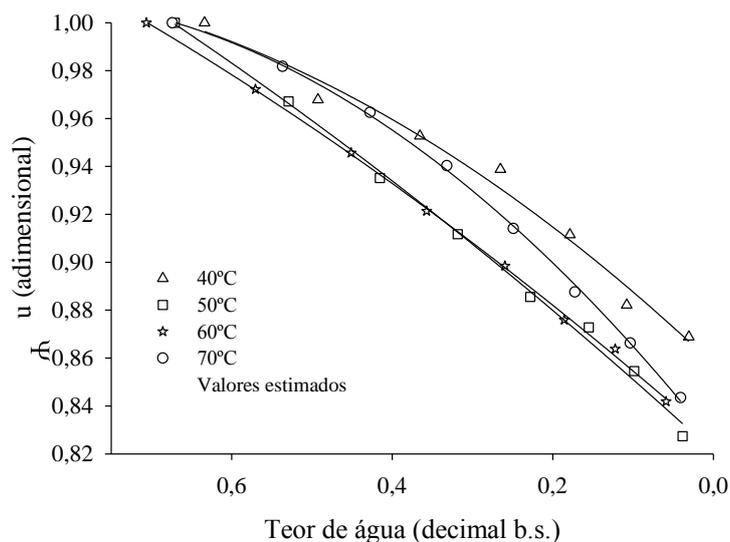


FIGURA 7. Valores observados e estimados, pelo modelo polinomial de segundo grau, da contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim, para todas as temperaturas do ar de secagem.

De acordo com a Figura 7, observa-se que o aumento da temperatura do ar de secagem não influenciou de forma significativa a redução volumétrica dos frutos de amendoim, evidenciando que o encolhimento unitário do produto é influenciado praticamente pela variação do teor de água durante o processo de secagem. Este tipo de comportamento também foi observado por Goneli et al. (2011), onde a contração volumétrica unitária dos frutos de mamona apresentou variações nas suas magnitudes, em função do teor de água do produto durante o processo de secagem. Siqueira et al., (2012) observaram resultados semelhantes, quando na ocasião trabalhavam com frutos de pinhão-manso.

3.3.3. Cinética da contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim

A Equação 10 apresenta a taxa de redução de volume proposta por Lespinard et al. (2009) em analogia à lei de resfriamento de Newton, utilizada para a avaliação do comportamento de produtos agrícolas durante a secagem. Entretanto, devido à rápida variação do volume dos grãos de amendoim no início da secagem, a Equação 10 não apresenta ajuste matemático adequado. Assim, para o caso dos grãos de amendoim, foi proposta a seguinte modificação na equação proposta por Lespinard et al., (2009):

$$\text{TRV} = \exp(-k.t^n) \quad (17)$$

A Equação 17 difere da Equação 10 apenas pela elevação do parâmetro temperatura do modelo pelo coeficiente (n). Desta forma, apresenta-se no Quadro 10, os valores dos parâmetros k e n da Equação 17, utilizada na modelagem dos dados observados da taxa de redução do volume dos grãos de amendoim, para todas as temperaturas em estudo (40, 50, 60 e 70°C) em função do tempo, juntamente com os respectivos valores dos parâmetros estatísticos, o desvio padrão da estimativa (SE) e o coeficiente de determinação (R²).

QUADRO 10. Parâmetros do modelo e parâmetros estatísticos utilizados na cinética da contração volumétrica unitária dos grãos de amendoim.

Temperatura (°C)	k	n	SE (decimal)	R ² (decimal)
40	0,5843	0,4779	0,0161	0,9981
50	0,6043	0,6338	0,0013	0,9999
60	0,6841	0,5698	0,0602	0,9745
70	0,7434	0,5948	0,0287	0,9941

De acordo com o Quadro 10 é possível verificar que, o parâmetro k tem seus valores elevados com o aumento da temperatura do ar de secagem, caracterizando a influência exercida pela temperatura em suas magnitudes. A mesma situação não ocorreu com o parâmetro n da Equação 17, onde seus valores não obtiveram tendência definida em suas magnitudes com a elevação da temperatura. Ainda no Quadro 10, nota-se que o modelo utilizado apresentou valores reduzidos do desvio padrão da estimativa e elevados valores dos coeficientes de determinação, independente da temperatura do ar de secagem, indicando ajuste satisfatório do modelo aos dados observados. Assim, a Equação 17, pode ser utilizada para representar o fenômeno da taxa de redução do volume dos grãos de amendoim em função do tempo. Afonso Júnior et al. (2004), também observaram resultados semelhantes aqueles encontrados no presente estudo, onde o modelo matemático ajustado representou satisfatoriamente a contração volumétrica dos frutos de café.

Na figura 8, são apresentados os valores observados e estimados da taxa de redução do volume dos grãos de amendoim, em função do tempo e da temperatura do ar de secagem.

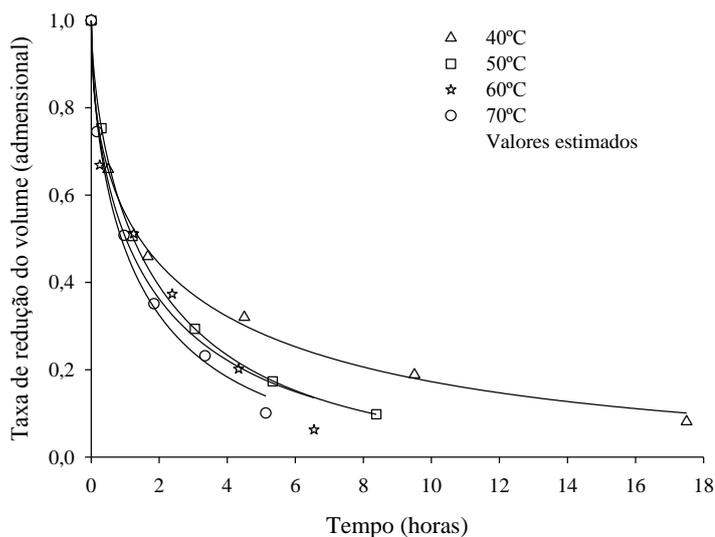


FIGURA 8. Valores observados e estimados, pelo modelo, da taxa de redução do volume dos grãos de amendoim em função do tempo, para diferentes temperaturas.

Como pode ser observado na Figura 8, o aumento da temperatura do ar de secagem corroborou para redução do tempo de encolhimento dos grãos de amendoim, concordando com Afonso Júnior et al. (2004), onde verificaram que a temperatura do ar de secagem foi o principal fator a afetar o processo de encolhimento dos frutos de café em função do tempo. Bayram et al., (2004) também observaram o efeito da temperatura, em diferentes níveis, durante a expansão volumétrica dos grãos de trigo em função do tempo.

Observa-se também na Figura 8 que no início do processo de secagem houve uma redução brusca do volume dos grãos de amendoim, tendendo os grãos, com o decorrer do tempo, a apresentarem equilíbrio volumétrico. Provavelmente este fenômeno esteja relacionado com o elevado teor de água contido no grão no início da secagem, bem como a íntima dependência do teor de água com a maioria das alterações físicas ocorridas nos produtos agrícolas. Ainda na Figura 8 nota-se o bom ajuste do modelo utilizado para descrever a redução do volume dos grãos de amendoim em função do tempo em todas as temperaturas do ar de secagem. O período necessário para a redução do volume dos grãos de amendoim de 0,63 a 0,05 decimal b.s. foi de 17,5, 8,4, 6,5, e 5,1 horas, respectivamente para as temperaturas de 40, 50, 60, e 70°C.

A Equação a seguir (18) apresenta os coeficientes da equação de Arrhenius ajustadas à taxa de redução do volume dos grãos de amendoim, de acordo com a Equação 17.

$$k = 2,867 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{7.531,2369}{R T_a}\right) \quad (18)$$

De acordo com a Equação 18, observa-se que nesse trabalho, a energia de ativação requerida para iniciar o processo da taxa de redução do volume dos grãos de amendoim foi de aproximadamente $7,53 \text{ kJ mol}^{-1}$, na faixa de temperatura estudada (40, 50, 60 e 70°C). Nesse caso, a energia de ativação é definida, como o mínimo de energia requerida para que desencadeie o processo de redução do volume dos grãos de amendoim. De acordo com Kayacier & Singh (2004), a energia de ativação reduz com a elevação do teor de água inicial do produto durante o processo de secagem.

Assim, usando a variação do parâmetro (k) da Equação 17 em função da temperatura (Equação 18), além da média dos valores encontrados para o parâmetro (n), podemos expressar a variação do volume dos grãos de amendoim em função do tempo da seguinte forma:

$$V = V_e + (V_0 - V_e) \exp\left\{-\left[2,867 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{7.531,2369}{R T_a}\right)\right] \cdot t^{0.5691}\right\} \quad (19)$$

No Quadro 11, são apresentados os valores do parâmetro k da Equação 10, utilizada na modelagem dos dados observados da cinética da contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim, para diferentes temperaturas do ar de secagem. Além dos valores dos parâmetros estatísticos, o desvio padrão da estimativa (SE) e o coeficiente de determinação (R^2).

Observando o Quadro 11, nota-se que, os valores do parâmetro k do modelo elevam-se de forma gradual e de maneira proporcional ao aumento da temperatura do ar de secagem, evidenciando a influência da temperatura em suas magnitudes. Tendo em vista os elevados coeficientes de determinação, obtidos através das análises de regressão, a equação ajustada aos dados observados, de modo geral, estimaram de forma satisfatória os valores experimentais da redução do volume dos frutos de amendoim. Oliveira et al., (2011) também utilizaram um modelo exponencial para descrever a contração volumétrica dos frutos de café, e observaram que o modelo foi adequado para representar de forma satisfatória o fenômeno de contração volumétrica.

QUADRO 11. Parâmetro do modelo e parâmetros estatísticos utilizados na cinética da contração volumétrica unitária dos frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	k	SE (decimal)	R ² (decimal)
40	0,1016	0,0622	0,9689
50	0,1838	0,0534	0,9691
60	0,2113	0,0318	0,9883
70	0,2419	0,0317	0,9898

Na figura 9, são observados os valores observados e estimados pelo modelo (Equação 10), onde a taxa de redução do volume dos frutos de amendoim, está em função do tempo e da temperatura do ar de secagem. É possível visualizar o comportamento característico da curva de secagem ao longo do processo, em todos os níveis de temperatura (40 50, 60 e 70°C).

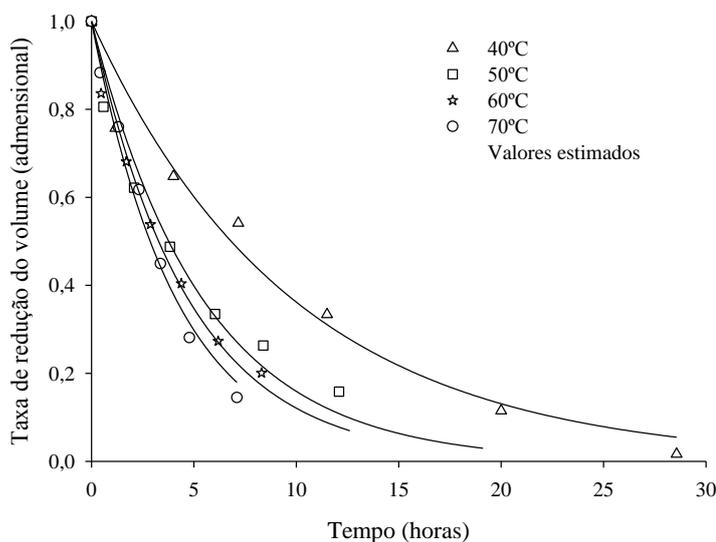


FIGURA 9. Valores observados e estimados, pelo modelo, da taxa de redução do volume dos frutos de amendoim em função do tempo, para diferentes temperaturas.

Torna-se possível verificar na Figura 9 que, à medida que aumenta o tempo de secagem e, em razão da redução do teor de umidade, menores valores da taxa de redução do volume foram encontrados para os frutos de amendoim, em todas as temperaturas do ar de secagem. Mediante aos resultados encontrados na Figura 9, verifica-se que a temperatura do ar de secagem foi o principal fator a afetar o processo de encolhimento dos frutos de amendoim em função do tempo. Lespinard et al. (2009), avaliaram o comportamento da contração volumétrica nas dimensões do cogumelos, também fazendo o uso de um modelo exponencial baseado na lei de resfriamento de

Newton, onde observaram influência da temperatura sobre a redução das dimensões do produto, ao longo do período de secagem.

Tomando como referência os dados estimados, observa-se o efeito dinâmico das condições de secagem sobre a taxa de redução do volume dos frutos de amendoim ao longo do período de dessecagem (Figura 9). A taxa de redução do volume diminuiu com o aumento da temperatura do ar de secagem. Constatou-se, por esse comportamento, que o encolhimento dos frutos de amendoim submetidos à secagem, está diretamente relacionado ao teor de umidade do produto e inversamente proporcional a temperatura do ar de secagem (AFONSO JÚNIOR et al., 2004). Ainda na Figura 9, pode-se verificar que, houve redução no tempo de secagem do produto com a elevação da temperatura do ar secante, mostrando que o período da taxa de redução do volume dos frutos de amendoim foi 28,5, 12,1, 8,3, e 7,1 horas, para as temperaturas de 40, 50, 60, e 70°C, respectivamente, que corresponde ao tempo requerido para que os frutos atingissem aproximadamente 0,10 decimal b.s.

Os coeficientes da equação de Arrhenius (Equação 20), ajustadas à taxa de redução do volume dos frutos de amendoim calculados de acordo com a Equação 11, apresentam-se a seguir:

$$k = 4,271 \times 10^{-1} \exp\left(-\frac{24.734,9814}{R T_a}\right) \quad (20)$$

Constatou-se, na presente situação, que a energia de ativação necessária, para iniciar o processo de redução do volume dos grãos e frutos de amendoim foi de aproximadamente 24,73 kJ mol⁻¹, para a faixa de temperatura estudada (40, 50, 60 e 70°C). Nesse caso, a energia de ativação definiu-se como o mínimo de energia requerida no desencadeamento do processo de redução do volume dos frutos de amendoim, ou seja, quanto menor for a energia de ativação maior será a redução do volume do produto. A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de redução do volume ocorra no produto (KASHANINEJAD et al., 2007)

Fazendo o uso da variação do parâmetro (k) da Equação 11 em função da temperatura (Equação 20), podemos expressar a variação do volume dos frutos de amendoim em função do tempo da seguinte forma:

$$V = V_e + (V_0 - V_e) \exp \left\{ - \left[4,271 \times 10^{-1} \exp \left(- \frac{24.734,9814}{R T_a} \right) \right] . t \right\} \quad (21)$$

3.3.4. Propriedades termodinâmicas durante a contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim

No Quadro 12 podemos observar os valores das propriedades termodinâmicas (entalpia, entropia e energia livre de Gibbs) utilizadas no processo da taxa de redução do volume dos grãos e frutos de amendoim.

QUADRO 12. Propriedades termodinâmicas do processo de taxa de redução do volume dos grãos e frutos de amendoim.

Temperatura (°C)	Grãos			Frutos		
	ΔH	ΔS	ΔG	ΔH	ΔS	ΔG
	kJ mol ⁻¹ K ⁻¹			kJ mol ⁻¹ K ⁻¹		
40	4,9276	-0,1408	49,0327	22,1314	-0,0992	53,2087
50	4,8445	-0,1411	50,4424	22,0482	-0,0995	54,2024
60	4,7613	-0,1414	51,8547	21,9651	-0,0998	55,1987
70	4,6782	-0,1416	53,2694	21,8819	-0,1000	56,1975

Analisando o Quadro 12, podemos notar que a entalpia tem seus valores reduzidos com o aumento da temperatura do ar secagem. Nesse caso, a entalpia fornece uma medida de energia que é necessária para a variação volumétrica durante a secagem dos grãos e frutos de amendoim. O encolhimento dos produtos agrícolas está diretamente relacionado com a redução do teor de água durante a secagem, que ocorre através da difusão da água do interior para superfície do material devido à diferença de pressão parcial de vapor de água entre produto e ar de secagem. Com a perda de água ocorre contração dos poros onde estas moléculas de água se encontravam e conseqüente redução do volume do produto. Desta forma, como a energia necessária para a movimentação da água no produto reduz com o aumento da temperatura, a energia necessária para o encolhimento do produto também reduz. Resultados semelhantes foram encontrados por Bayram et al., (2004), trabalhando com expansão volumétrica de grãos de trigo.

Também é possível verificar no Quadro 12 que, assim como ocorre com a entalpia, os valores da entropia também reduziram com a elevação da temperatura do ar de secagem. A entropia nos fornece grau de dificuldade ou a barreira termodinâmica

existente para a realização de um determinado processo, sendo que quanto maior for sua magnitude, mais difícil se torna a execução deste processo. Com a elevação da temperatura ocorre uma maior excitação das moléculas de água, proporcionando maior mobilidade deste fluido do interior para a extremidade do produto durante a secagem, e conseqüentemente, redução de seu volume. Bayram et al., (2004), também observaram esse tipo de comportamento durante a expansão volumétrica dos grãos de trigo. Moreira et al., (2008), relatam que os valores negativos de entropia podem estar atribuídos à existência de adsorção química e ou modificações estruturais do adsorvente.

Ainda no Quadro 12, observa-se que houve aumento nos valores da energia livre de Gibbs com aumento da temperatura do ar de secagem. A energia livre de Gibbs expressa a máxima energia disponível para a realização de um trabalho, bem como da espontaneidade de um determinada reação. O valor positivo da energia livre de Gibbs encontrado neste trabalho indica que a contração volumétrica dos grãos e frutos de amendoim ocorre de maneira não espontânea, sendo característico de uma reação endergônica, ou seja, processo que envolve o consumo de energia. Nkolo Meze'e et al., (2008), relatam que a energia livre de Gibbs está atribuída ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis.

3.4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pode ser concluído que:

- A redução do teor de água influenciou nos valores da contração volumétrica unitária e da massa dos grãos e frutos do amendoim, durante o processo de secagem.
- O modelo matemático indicado para representar o fenômeno da contração volumétrica unitária e da massa dos grãos amendoim foi o Polinomial, este modelo também se comportou de forma satisfatória na contração volumétrica da massa dos frutos de amendoim. Quanto à contração volumétrica unitária dos frutos, o modelo Linear foi o indicado.
- O aumento da temperatura do ar de secagem promoveu redução no tempo de redução do volume, durante a avaliação da contração volumétrica unitária dos grãos e frutos de amendoim.
- As propriedades termodinâmicas entalpia e entropia foram reduzidas com o aumento da temperatura do ar de secagem. A energia livre de Gibbs aumentou com o aumento de temperatura, sendo suas magnitudes positivas na faixa de temperatura utilizada no presente trabalho.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; VILARINHO, M. C.; FRANÇA, A. S. Dinâmica da contração volumétrica do fruto de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial Café, n. 8, p. 29-35, 2004.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; PINTO, F.A.C.; SAMPAIO, C.P. Shrinkage evaluation of five different varieties of coffee berries during the drying process. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 4, p. 481-485, 2003.

BALA, B. K.; WOODS, J. L. Simulation of deep bed malt drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 235-244, 1984.

BAYRAM, M.; ÖNER, M.D.; EREN, S. Thermodynamics of the dimensional changes in the wheat kernel during cooking for bulgur production. **Food Sci Tech**, n 10, v. 4, p. 243-253, 2004.

BENAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Numerical simulation of drying under variable external conditions: application to solar drying of seedless grapes. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 2, p. 179-187, 2006.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, p. 395, 2009.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Mathematical modeling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: International drying symposium, v.14, 2004.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GARIN, S.A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G.H.H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 716-726, 2011.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.665-670, 2006.

GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Postharvest Technology**, v. 81, n. 1, p. 85-97, 2002.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, p.1-8, 2011.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v. 92, p. 182–188. 2009.

KAYACIER, A.; SINGH, R. K. Application of effective diffusivity approach for the moisture content prediction of tortilla chips during baking. **Swiss Society of Food Science and Technology**, v.37, p.275-281, 2004.

KOÇ, B.; EREN, I.; ERTEKIN, F. K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 3, p. 340-349, 2008.

LESPINARD, A.R.; GOÑI, S.M.; SALGADO, P.R.; MASCHERONI, R.H. Experimental determination and modeling of size variation, heat transfer and quality indexes during mushroom blanching. **Journal of Food Engineering**. v.92, p.8–17, 2009.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004.

MCMINN, W.A.M.; AL-MUHTASEB, A.H.; MAGEE, T.R.A. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, v. 38 p. 505–510. 2005.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. v.66, p.513-518, 2005.

MOSHENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, p. 841, 1986

NAYAK, L.; PANDEY, J.P. Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice. **Journal of the Institution of Engineers**, v. 80p. 43–45, 2000.

NKOLO MEZE'E, Y.N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy–entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. L'Eonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, 468:1–5. 2008.

OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; JÚNIOR, P.C.A.; CAMPOS, S.C. Modeling of the shrinkage kinetics of coffee berries during drying. **Acta Scientiarum**. v. 33, n. 3, p. 423-428, 2011.

RAMOS, I. N.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Integrated approach on solar drying, pilot convective drying and microstructural changes. **Journal of Food Engineering**, v. 67, n. 1-2, p. 195-203, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; CECON, P. R. Forma, tamanho e contração volumétrica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 1, p. 15-24, 2005.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 2, p. 247-256, 2010.

RIBEIRO, D. M.; CORRÊA, P. C.; RODRIGUES, D. H.; GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 3, p. 611-617, 2005.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Contração volumétrica dos frutos de pinhão-mansão durante a secagem em diversas temperaturas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 36, p. 171-178, 2011.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, p. 231-238, 2012.

TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v.343 p. 49-56, 2000.