

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**DIMENSIONAMENTO E EXPERIMENTAÇÃO DE UM SECADOR
DE LEITO FIXO PARA A SECAGEM DE PRODUTOS
AGRÍCOLAS**

ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
FEVEREIRO - 2015**

**DIMENSIONAMENTO E EXPERIMENTAÇÃO DE UM
SECADOR DE LEITO FIXO PARA A SECAGEM DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS
Engenheiro Agrícola

Orientador: PROF DR. ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI
Co-Orientador: PROF. DR. LUCIANO OLIVEIRA GEISENHOF
Co-Orientador: PROF. DR. RODRIGO APARECIDO JORDAN

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

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M379d Martins, Elton Aparecido Siqueira.
Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas. / Elton Aparecido Siqueira Martins. – Dourados, MS : UFGD, 2015.
123p.

Orientador: Prof. Dr. André Luís Duarte Goneli.
Co-orientador: Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff.
Prof. Dr. Rodrigo Aparecido Jordan
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Produtos agrícolas – Secagem – Agricultura e energia. I. Título.

CDD – 631.3

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

“Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas”

por

ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS

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

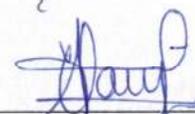
Aprovada em: 26/02/2015



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



Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff
UFGD/FCA



Profa. Dra. Eliana Janet Sanjinez Argandoña
UFGD/FAEN

Dedico

Aos meus pais:

Durval Miranda Martins

&

Roseli Aparecida Siqueira Martins

Ofereço

*À minha noiva,
Aline de Carvalho Jorge*

*À minha irmã,
Juliana Siqueira Martins*

*À minha sobrinha,
Alana Siqueira Martins*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, saúde, oportunidades e perseverança para alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais Durval Miranda Martins e Roseli Aparecida Siqueira Martins, pelo apoio, confiança, solidariedade, suporte e carinho agora e sempre.

A minha irmã Juliana Siqueira Martins e minha sobrinha Alana Siqueira Martins, por proporcionar momentos de alegria.

À minha noiva Aline de Carvalho Jorge pelo amor, companheirismo, apoio e paciência.

Ao Prof. André Luís Duarte Goneli pelas orientações concedidas, conhecimentos transmitidos, pela oportunidade, confiança e amizade.

Ao Prof. Luciano Oliveira Geisenhoff pela co-orientação, pelos valiosos ensinamentos sobre automação agrícola e pela amizade.

Ao Prof. Rodrigo Aparecido Jordan pela co-orientação, inúmeras sugestões para o desenvolvimento deste trabalho e pela amizade.

Ao Prof. Munir Mauad pela amizade e ajuda para obtenção dos grãos de cártamo utilizados neste trabalho.

Aos Professores Eder Pereira Gomes e Valdiney Cambuy Siqueira pela amizade e conselhos dados durante essa caminhada.

À Prof.^a Eliana Janet Sanjinez Argandoña pelas suas contribuições científicas durante a defesa deste trabalho.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Faculdade de Ciências Agrárias-UFGD pela oportunidade da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (Fundect) pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos amigos do curso de mestrado, em especial, Amilcar I. S. Niz, Cesar P. Hartmann Filho, Eduardo Z. Lage, Evaldo F. Ribeiro, Manuel C. Pereira, Vagner A. Soares e Wesley A. Martins pelo companheirismo e ajuda durante essa caminhada. E a todos os demais companheiros do curso de mestrado.

Aos amigos, dos cursos de graduação em Agronomia e Engenharia Agrícola, Alexandre A. Gonçalves, Henrique C. B. Vilhasanti, Murilo H. R. Santos e Renato T. Garcia, pela ajuda concedida durante a realização deste trabalho.

À Antônio Carlos Montanari, gestor da empresa ACM Secadores, situada em Dourados-MS, e seus funcionários pela prestatividade em executar o projeto do secador experimental, fruto deste trabalho.

Enfim, a todos que de uma forma ou outra contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Secagem de produtos agrícolas.....	1
1.2 A cultura do cártamo.....	3
1.3 Objetivos gerais.....	6
1.3.1 Objetivos específicos.....	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	7
CAPÍTULO 1	
DIMENSIONAMENTO DE UM SECADOR EXPERIMENTAL PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS.....	9
1.1 INTRODUÇÃO.....	9
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
1.2.1 Dimensionamento da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar.....	14
1.2.2 Dimensionamento geométrico do secador.....	15
1.2.2.1 Leito de secagem em camada espessa.....	16
1.2.2.2 Câmara de distribuição de ar (Plenum).....	16
1.2.2.3 Expansões.....	17
1.2.2.4 Homogeneizadores.....	17
1.2.2.5 Isolamento térmico.....	18
1.2.3 Seleção do ventilador para o secador.....	18
1.2.4 Automação do secador experimental.....	19
1.2.5 Teste de validação do secador experimental.....	20
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
1.3.1 Cálculo da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar.....	25
1.3.2 Dimensionamento geométrico do secador.....	29
1.3.2.1 Leito de secagem em camada delgada e espessa.....	29
1.3.2.2 Plenum e expansões.....	33
1.3.2.3 Homogeneizadores.....	34
1.3.2.4 Isolamento térmico.....	35
1.3.3 Seleção do ventilador para o secador.....	36
1.3.4 Automação do secador experimental.....	40
1.3.5 Teste de validação do secador experimental.....	46

1.4 CONCLUSÕES	53
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
CAPÍTULO 2	
CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE CÁRTAMO	57
2.1 INTRODUÇÃO	57
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	62
2.2.1 Determinação do coeficiente de difusão efetivo	66
2.2.2 Influência da temperatura	67
2.2.3 Análise estatística	68
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
2.3.1 Determinação do coeficiente de difusão efetivo	78
2.3.2 Influência da temperatura	79
2.4 CONCLUSÕES	85
2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
CAPÍTULO 3	
PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE CÁRTAMO	91
3.1 INTRODUÇÃO	91
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	95
3.2.1 Massa específica aparente e unitária	96
3.2.2 Porosidade da massa	97
3.2.3 Massa de 1000 grãos	98
3.2.4 Forma e tamanho	98
3.2.4.1 Esfericidade e circularidade	98
3.2.4.2 Área projetada	99
3.2.4.3 Área superficial	99
3.2.5 Índice de contração da massa e unitária	101
3.2.6 Análise estatística	102
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
3.3.1 Propriedades físicas	104
3.3.2 Análise da forma e tamanho dos grãos	109
3.3.3 Contração da massa e unitária	115
3.4 CONCLUSÕES	119
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
CONCLUSÕES GERAIS	123

MARTINS, Elton Aparecido Siqueira. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 2015. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

RESUMO

A secagem é uma etapa essencial para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas na pós-colheita. O conhecimento das curvas de secagem em camada delgada e a variação das propriedades físicas dos produtos agrícolas durante a secagem, fornecem informações fundamentais para o desenvolvimento, otimização e operação de equipamentos destinados a esta etapa pós-colheita. Dentre as variáveis que geram influência sobre o processo de secagem, a temperatura e a velocidade do ar estão entre as mais importantes, interferindo diretamente nas curvas de secagem. Em geral, as pesquisas desenvolvidas sobre a secagem de produtos agrícolas são realizadas em laboratório, estudando apenas o efeito da temperatura, normalmente desenvolvidas em estufas de circulação forçada de ar. O presente trabalho teve como objetivo dimensionar, construir e avaliar um secador experimental com controle de temperatura e velocidade do ar de secagem, visando estudos de secagem de produtos agrícolas em camada delgada. O projeto do secador experimental foi dividido em três etapas: dimensionamento da fonte de aquecimento, dimensionamento geométrico da estrutura do secador e seleção do ventilador para atender a demanda operacional do secador. O dimensionamento geométrico das expansões, homogeneizadores de ar e plenum do secador experimental foram feitos com base em recomendações encontradas na literatura. A execução do projeto foi desenvolvida em duas fases, sendo a primeira a construção da estrutura do secador e a segunda a automação do controle de temperatura e velocidade do ar. Para avaliação das variáveis projetadas, foram feitas medições de temperatura e velocidade do ar de secagem e temperatura do corpo do secador. Além disso, realizou-se um experimento de cinética de secagem em camada delgada para avaliar a eficácia do secador. Grãos de cártamo foram submetidos à secagem, em camada delgada, com diferentes níveis de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e velocidade do ar (0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹). As propriedades físicas dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem, em uma temperatura de 40 °C, também foram determinadas. Os resultados encontrados permitem concluir que o secador experimental apresentou resultados satisfatórios do controle de temperatura e velocidade do ar, quando testado em ensaios de secagem. O secador projetado foi eficiente em obter as curvas de secagem em camada delgada dos grãos de cártamo para todas as condições de ar de secagem avaliadas neste estudo, sendo o tradicional modelo de Page, dentre os modelos que se ajustaram satisfatoriamente aos resultados experimentais, o escolhido para representar suas curvas de secagem. Em todas as propriedades físicas avaliadas para a cultura do cártamo, houve influência da redução do teor de água durante a secagem.

Palavras-chave: Desidratador; velocidade do ar; resistências elétricas; *Carthamus tinctorius* L.; modelo de Page, propriedades físicas.

MARTINS, Elton Aparecido Siqueira. **Design and testing of a fixed bed dryer for drying of agricultural products**. 2015. 123p. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineering) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

ABSTRACT

Drying is an essential step in maintaining the quality of agricultural products in post-harvest. Knowledge of drying curves thin layer and the variation of the physical properties of agricultural products during drying, provide key information for the development, optimization and operation of equipment for this post-harvest stage. Among the variables that generate influence on the drying process, the temperature and air velocity are among the most important, directly impacting drying curves. In general, the research developed about the drying of agricultural products are carried in the laboratory, studying the effect of temperature, normally developed in forced air-ventilated oven. The present study aimed to design, build and evaluate an experimental dryer with temperature control and drying air velocity, aiming drying studies of agricultural products thin layer. The design of the experimental dryer was divided into three stages: heating supply dimensioning, geometric dimensioning of the dryer structure and fan selection to meet the operational demands of the dryer. The geometric dimensioning of expansions, homogenizers air and plenum of the experimental dryer were made based on recommendations in the literature. The execution of the project was developed in two phases, the first being the construction of the dryer structure and the second automation temperature control and air velocity. For evaluation of the projected variables, measurements of temperature and velocity of the drying air were made and temperature of the dryer structure. Furthermore, there was a drying kinetics experiment thin layer to evaluate the efficacy of the dryer. Safflower grains were subjected to drying, a thin layer with different temperature levels (40, 50, 60, 70 and 80 °C) and air velocity (0.4, 1.0 and 1.6 m s⁻¹). The physical properties of safflower for different grain moisture contents during drying at a temperature of 40 °C was also determined. The obtained results allow concluding that the experimental dryer presented satisfactory results of the temperature control and air velocity when tested in drying experiments. The designed dryer was efficient in getting the drying curves thin layer of safflower grain for all drying air conditions evaluated in this study, the traditional model of Page, among the models satisfactorily fitted the experimental results, the chosen to represent their drying curves. In all evaluated for physical properties safflower culture, was no effect of reducing the moisture content during drying.

Keywords: Dehydrator; air velocity; electric resistances; *Carthamus tinctorius* L.; Page model; physical properties.

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Secagem de produtos agrícolas

Com a crescente necessidade de produzir cada vez mais e com qualidade, para atender a demanda populacional e industrial, os produtos agrícolas vêm sendo colhidos antecipadamente com relação ao teor de água adequado para o armazenamento seguro, visando reduzir as perdas ocorridas a campo, ataque de insetos e microorganismos, e desocupar a área para antecipar o cultivo de novas culturas. Com isso, colhe-se os produtos com teor de água inadequado para armazená-los por longos períodos com segurança para que possam ser comercializados e industrializados no decorrer do ano. Para possibilitar o armazenamento seguro é necessário proceder a redução do teor de água, por meio do processo de secagem, até níveis que permitam manter reduzidas as atividades físicas, químicas e biológicas do produto durante o armazenamento.

A secagem tem por finalidade retirar o excesso de água contido no produto por meio de evaporação. É definida como um processo simultâneo de transferência de calor do ar para o produto e massa (água) do produto para o ar (BROOKER et al., 1992). Esse processo ocorre devido à diferença de pressão de vapor entre a superfície do produto e o ar de secagem, sendo que para a secagem ocorrer a pressão de vapor na superfície do produto deve ser maior que a pressão de vapor do ar de secagem. Enquanto maior a diferença de pressão de vapor, maior é a capacidade de secagem do sistema, sendo essa condição gerada pelo aquecimento do ar de secagem.

Durante o processo de secagem ocorre a movimentação da água do interior para a superfície do produto para que ocorra a evaporação. Os mecanismos mais importantes para a movimentação da água no produto durante o processo de secagem são: a difusão líquida, a qual ocorre devido a existência do gradiente de concentração de teor de água; a difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão de vapor causado pelo gradiente de temperatura para vaporizar a água contida no produto; e pelo fluxo de líquido e vapor, que ocorrem devido a diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e temperatura elevada (PARK et al., 2007).

A secagem de produtos agrícolas é um processo que pode demorar desde algumas horas até vários dias, dependendo de alguns fatores como: método de secagem, temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de secagem e tipo de produto.

Buscando otimizar e solucionar problemas decorrentes do processo de secagem, diversos pesquisadores vem estudando diferentes condições para este processo, para conseguir fomentar informações para que seja possível projetar, otimizar e operar os secadores com maior eficiência, visando a qualidade do produto e a redução do custo do processo de secagem.

Para reunir essas informações os pesquisadores vêm estudando o comportamento das curvas de secagem em camada delgada, de diferentes produtos em diferentes condições de secagem. As curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo de pós-colheita entre outros fatores (Resende et al., 2008). A simulação e obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto é um importante parâmetro no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos para secagem de produtos agrícolas. Para isso fazem-se uso de modelos matemáticos que possam representar satisfatoriamente a perda de água durante o processo de secagem para sucessivas camadas delgadas do produto (BERBERT et al., 1995).

As principais características do ar que podem ser controladas que interferem diretamente nas curvas de secagem dos produtos agrícolas são temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. Dentre as três variáveis, a temperatura e a velocidade do ar de secagem são as mais fáceis de serem controladas durante o processo de secagem, sendo essas variáveis controladas em secadores convencionais. Já a umidade relativa do ar é uma variável mais difícil de ser controlada, devido à complexidade e ao custo dos equipamentos utilizados.

Nos estudos sobre a secagem de produtos agrícolas, realizados em nível de laboratório, o efeito da temperatura do ar no processo é o parâmetro mais estudado. Além deste ser o principal parâmetro no processo, outro fato que faz com que seja o mais estudado é devido muitas pesquisas serem realizadas em estufas de circulação forçada de ar (COSTA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012; SANTOS et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013; GONELI et al., 2014). Nesses equipamentos é possível apenas controlar a temperatura, não sendo possível o controle da velocidade do ar de secagem.

Devido à importância do processo de secagem de produtos agrícolas, visando a manutenção da qualidade e a necessidade de buscar informações para realizar esse procedimento de modo a reduzir o custo do processo e fomentar informações para o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos equipamentos e operações de secagem, torna-se cada vez mais importante buscar meios de pesquisar o efeito da temperatura e velocidade do ar sobre as curvas de secagem dos produtos agrícolas.

Tão importante quanto às curvas de secagem dos produtos agrícolas é o conhecimento das propriedades físicas dos mesmos para as etapas de pós-colheita e até mesmo de colheita. Pois durante a secagem ocorrem mudanças significativas na composição química, estrutura e nas propriedades físicas dos alimentos (KOÇ et al., 2008).

As propriedades físicas e geométricas, como a massa específica, porosidade, tamanho, volume, entre outras propriedades físicas, são informações de suma importância para projetar e dimensionar máquinas e equipamentos destinados a pós-colheita de produtos agrícolas, bem como para estudos envolvendo a transferência de calor e massa, e movimentação de ar em massas granulares (GONELI et al., 2011).

1.2 A cultura do cártamo

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma cultura oleaginosa, originária da Ásia e África, cultivada a mais de 2000 mil anos, conhecida também pelos nomes de “açafroa”, “açafraão bastardo”, *safflower*, dentre outras denominações. O nome do gênero *Carthamus*, em árabe, refere-se à cor avermelhada extraídas de suas flores, o qual pode ser utilizado na pigmentação de alimentos, tecidos e outros objetos, e a espécie *C. tinctorius* refere-se a tintura ou cor (ABUD et al., 2010; CORONADO, 2010).

É uma cultura anual, pertencente a família Asteraceae, de caule ereto, ramificado, com altura variando entre 0,3 e 1,5 m, com sistema radicular pivotante e bem desenvolvido, podendo atingir até 3 m de profundidade (DAJUE e MÜNDEL, 1996; SEHGAL & RAINA, 2005). É uma planta que oferece elevada resistência à seca, às altas temperaturas e aos solos salinos, com ciclo vegetativo variando de 120 até 150 dias (KIZIL et al., 2008; CORONADO, 2010; PADILHA et al., 2012).

O teor de óleo das sementes de cártamo pode variar de 20 a 45% (DAJUE e MÜNDEL, 1996; COŞGE et al., 2007), em média apresenta 35% de teor de óleo de qualidade elevada, podendo ser utilizado tanto para consumo humano, quanto para uso industrial (PADILHA et al., 2012). A composição do óleo de cártamo possui elevados níveis de ácidos graxos insaturados e saturados, composto por ácido palmítico (6-8%), ácido esteárico (2-3%), ácido oléico (16-20%), e ácido linoléico (71-75%) (GOLKAR, 2014).

O cártamo é uma planta que apresenta múltiplos usos para a sociedade, inclusive como planta ornamental, visando a produção de flores devido a cor e beleza das mesmas, a qual já é usada com esse propósito na Europa e até mesmo no Brasil (BELLÉ et al., 2012). A planta pode ainda ser usada para a alimentação animal, por meio da confecção do feno ou silagem. Em termos de alimentação animal, as sementes do cártamo podem ser utilizadas para alimentação de pássaros, e a torta dos grãos de cártamo, proveniente do esmagamento das sementes para extração do óleo também pode ser usada na alimentação de ruminantes, apresentando em torno de 25% de proteína (EKIN, 2005; EMONGOR, 2010; PADILHA et al., 2012).

Uma das aplicações de destaque do cártamo é o seu uso na indústria farmacêutica, em que há usos em medicamentos a base de cártamo atuando no combate e prevenção de diversas enfermidades, como em doenças vasculares cardíacas e cerebrais, pressão arterial elevada, diabetes e outras doenças relacionadas com a estagnação do sangue e distúrbios da microcirculação (EKIN, 2005; EMONGOR, 2010). Já para fins industriais o óleo de cártamo pode ser utilizado para fabricação de tintas, vernizes, sabões, entre outros produtos. Outro uso muito importante do óleo de cártamo no atual contexto de busca por fontes de energias alternativas e renováveis é o seu potencial para a produção de biodiesel e biolubrificantes (EKIN, 2005; PADILHA et al., 2012).

O cártamo apesar ser uma cultura rústica, apresentando grande potencial produtivo e capacidade de se adaptar a diferentes condições climáticas e de solo, possui pouca expressão econômica no Brasil, devido a falta de disseminação de conhecimentos e estudos técnicos com relação ao seu cultivo e produção em nosso ambiente (SILVA, 2013; GERHARDT, 2014).

Na atual condição do setor energético, tanto brasileiro quanto a nível mundial, todos buscam por fontes alternativas e renováveis de energia. Dentre estas fontes está a produção de biodiesel, pois os combustíveis fósseis são uma fonte de

energia natural e findável. Com isso culturas oleaginosas são de muita importância, visando a produção de biodiesel. Entre as culturas oleaginosas, o cártamo é uma das culturas que apresenta grande potencial de uso no Brasil.

Diferente de algumas outras oleaginosas cultivadas no Brasil, que apresentam potencial para a produção de biodiesel, o cártamo apresenta como vantagem, ciclo relativamente curto, que possibilita o cultivo na safrinha, em sequência aos tradicionais cultivos de milho e soja. Na safrinha, um dos problemas que os produtores de grãos, que não possuem sistemas de irrigação, estão enfrentando é a irregularidade das precipitações pluviárias, algo que pode comprometer culturas mais sensíveis a escassez de água em determinados estágios de desenvolvimento, como é o caso da soja e do milho, sendo o cártamo uma cultura resistente a baixa disponibilidade de água (SILVA, 2013; GERHARDT, 2014).

Outra vantagem muito importante, é que para o cultivo e colheita do cártamo não é necessário adquirir semeadoras e colhedoras específicas para tal, podendo fazer uso das mesmas máquinas utilizadas para as culturas tradicionais, como a soja e o milho, necessitando apenas de algumas regulagens para as devidas operações.

A cultura do cártamo, também, é uma opção de cultivo nas regiões semi-áridas do país, como no caso do nordeste, devido a sua rusticidade, podendo ainda ser implementado políticas de agricultura familiar para o cultivo desta oleaginosa, visto que é uma planta com múltiplos usos na agricultura, como por exemplo, em que pequenos agricultores podem cultivá-la visando a extração de óleo e usar os resíduos provenientes do processo de extração para alimentação de seus animais.

A respeito da potencialidade de produção desta cultura no país, Padilha et al. (2012), no Estado do Paraná, relataram a produtividade em torno de 1500 kg ha⁻¹ com rendimento em óleo comparável a soja e ao girassol (0,4 a 0,6 t ha⁻¹).

Devido a importância, potencialidade e possibilidades desta cultura ser uma importante fonte de óleo vegetal e outros produtos para o Brasil, torna-se necessário desenvolver estudos sobre o processo de secagem e comportamento das propriedades físicas dos grãos desta cultura, fomentando assim informações para projetar otimizar, e operar com mais eficiência equipamentos destinados à colheita e pós-colheita.

1.3 Objetivos gerais

Objetivou-se com o presente trabalho dimensionar, construir e testar um equipamento para a secagem de produtos agrícolas em camada delgada e que, secundariamente, também possibilite a secagem em camada espessa.

1.3.1 Objetivos específicos

O presente trabalho foi desenvolvido com os seguintes objetivos específicos:

- dimensionar e construir um equipamento (secador) para a secagem de produtos agrícolas em camada delgada, e que possibilite a secagem em camada espessa;
- automatizar o controle de temperatura e de velocidade do ar de secagem;
- avaliar a distribuição de ar e da temperatura no leito de secagem em camada delgada;
- realizar testes de secagem em camada delgada e espessa;
- avaliar a cinética de secagem em camada delgada de grãos de cártamo em diferentes temperaturas (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e velocidades do ar de secagem (0,4 ; 1,0 e 1,6 m s⁻¹); e
- determinar a variação das propriedades físicas dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem em estufa de circulação forçada de ar a 40 °C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUD, H.F.; GONÇALVES, N.R.; REIS, R.G.E.; GALLÃO, M.I.; INNECCO, R. Morfologia de sementes e plântulas de cártamos. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.2, p.259-265, 2010.
- BELLÉ, R.A.; ROCHA, E.K.; BACKES, F.A.A.L.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. Safflower grown in different sowing dates and plant densities. **Ciência Rural**, v.42, n.12, p.2145-2152, 2012.
- 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, n.3, p.167-73, 1995.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.H. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.
- CORONADO, L.M. El cultivo del cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en México. **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias**, México, 2010. 96p.
- COŞGE, B.; GÜRBÜZ, B.; KIRALAN, M. Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter. **International Journal of Natural and Engineering Sciences**, v.1, n.3, p.11-15, 2007.
- 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.
- DAJUE, L.; MÜNDEL, H. H. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. **International Plant Genetic Resources**, Italy, 1996. 83p.
- EKIN, Z. Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Utilization: A Global View. **Journal of Agronomy**, v.4, n.2, p.83-87, 2005.
- EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the Underutilized and Neglected Crop: A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.9, n.6, p.299-306, 2010.
- GERHARDT, I.F.S. **Divergência genética entre acessos de cártamo** (*Carthamus tinctorius* L.). 2014. 35p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu.
- GOLKAR, P. Breeding improvements in safflower (*Carthamus tinctorius* L.): A review. **Australian Journal of Crop Science**, v.8, n.7, p.1079-1085, 2014.
- 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, n.1, p.1-8, 2011.

GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; VILHASANTI, H.C.B.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária e Tropical**, v.44, n.1, p.56-64, 2014.

KIZIL, S.; ÇAKMAK, Ö.; KIRICI, S.; İNAN, M.A. Comprehensive study on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) in semi-arid conditions. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, v.22, n.4, p.947-953, 2008.

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.

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, n.2, p.190-201, 2012.

PADILHA, A.C.M.; GOLLO, S.S.; SILVA, M.N. **Estudos na Cadeia Produtiva do Biodiesel**. Jaguarão/RS: Unipampa, 2012, 255p.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C., OLIVEIRA, R.A., PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf>. Acesso em: 28 maio 2013.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

SANTOS, D.C; QUEIROZ, A. J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.223-231, 2013.

SEHGAL, D.; RAINA, S.N. Genotyping safflower (*Carthamus tinctorius*) cultivars by DNA fingerprints. **Euphytica**, v.146, n.1-2, p.67-76, 2005.

SILVA, C.J. **Caracterização agrônômica e divergência genética de acessos de cártamo**. 2013. 51p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas Botucatu.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES T.H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.278-285, 2013.

CAPÍTULO 1

DIMENSIONAMENTO DE UM SECADOR EXPERIMENTAL PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

1.1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos desenvolvidos para a secagem de produtos agrícolas, denominados secadores, são construídos sob diversas formas geométricas internas e externas, para que se obtenham diferentes formas de escoamento de ar e de produto durante o processo de secagem, e diferentes formas de operação, visando a eficiência do processo e a manutenção da qualidade do produto durante e após a secagem.

Os secadores de produtos agrícolas podem ser classificados em três tipos quanto ao fluxo de produto: secadores estacionários, secadores intermitentes e secadores contínuos (DALPASQUALE et al., 1991; MILMAN, 2002).

Os secadores denominados estacionários ou em camada fixa ou ainda denominados de leito fixo são caracterizados por assemelharem-se a silos cilíndricos, não necessariamente possuindo a mesma altura de um silo cilíndrico convencional. O leito de secagem destes secadores possui fundo composto por chapas perfuradas, por onde é insuflado o ar de secagem, ficando o produto em repouso sobre as chapas perfuradas durante o processo de secagem (MILMAN, 2002; GARCIA et al., 2004; SILVA et al., 2008a).

A secagem em camada estacionária ou fixa consiste em forçar o fluxo de ar de secagem através de uma camada de produto que permanece estática no interior do secador (GARCIA et al., 2004). Dentre os métodos de secagem artificiais, os secadores estacionários são os únicos que permitem a secagem com ar não aquecido, a qual depende do equilíbrio higroscópico entre o produto e o ar de secagem, que consequentemente depende da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente (MILMAN, 2002).

Para a secagem de grãos em secador de leito fixo, em altas temperaturas (40 a 80 °C), recomenda-se que a espessura da camada seja inferior a 0,6 m, sendo necessário ainda, o revolvimento manual ou mecânico do produto em intervalos regulares de tempo, para evitar que ocorra a supersecagem próximo a entrada de ar, gerando assim um gradiente de teor de água no produto (DALPASQUALE et al., 1991; SILVA et al., 2008a). Camadas mais espessas que 0,6 m, na maioria dos

produtos agrícolas, podem gerar um gradiente de teor de água de até 5% entre as camadas inferiores e superiores e, o fluxo de ar normalmente empregado na secagem de produtos agrícolas em camada fixa varia de 0,12 a 0,25 m³ s⁻¹ m⁻² (DALPASQUALE et al., 1991).

O sistema de secagem em camada fixa é muito utilizado em pesquisas para estudar a cinética de secagem de produtos agrícolas e fazer simulações do processo de secagem, por meio de modelos matemáticos. Para estudar a cinética de secagem de produtos agrícolas os pesquisadores submetem camadas delgadas destes produtos a secagem, em leito fixo, e acompanham a variação de massa dos mesmos no decorrer do processo, conseguindo assim descrever a curva de secagem destes produtos.

A secagem em camada delgada ou fina é definida como aquela com a espessura de apenas uma unidade do produto e, uma camada espessa é constituída por uma sucessão de camadas delgadas superpostas (KASHANINEJAD et al., 2007). Quando combinada a equação que descreve a secagem de um produto em camada delgada com as equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em questão, forma um conjunto de relações matemáticas que auxiliam nos cálculos e no entendimento do processo de secagem em camada espessa (MARTINAZZO et al., 2010).

A simulação do processo de secagem em secadores que operam em altas temperaturas por meio de modelos matemáticos, tem-se tornado uma ferramenta importante para os engenheiros que trabalham na área de secagem e armazenagem de grãos (QUEIROZ et al., 1999). Com isso, a simulação de diversos processos vem sendo amplamente utilizada para auxiliar no desenvolvimento de equipamentos mais eficientes.

Muitos pesquisadores estudam a cinética de secagem de diversos produtos agrícolas em camada delgada, sendo que boa parte destes estudos são realizados em estufas de circulação forçada de ar (COSTA et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012; SANTOS et al., 2013; SIQUEIRA et al., 2013; GONELI et al., 2014), nas quais é apenas possível controlar a temperatura do ar de secagem durante o processo. O fluxo de ar em estufas é fixo, não possibilitando alteração do mesmo para diferentes ensaios, sendo que o fluxo de ar é uma das variáveis que interfere diretamente no processo de secagem de produtos agrícolas.

Os principais fatores que afetam o processo de secagem são a temperatura e a velocidade do ar de secagem, tendo influência direta no tempo de secagem e na qualidade final do produto. Quanto maior a temperatura e a velocidade do ar de secagem, menor será o tempo de secagem do produto, assim como também a

possibilidade de perda de qualidade devido ao estresse hídrico gerado pela elevada taxa de secagem (CARLESSO et al., 2005).

Devido a necessidade de estudar o processo de secagem de produtos agrícolas com condições controladas de temperatura e velocidade do ar e, até mesmo a interação entre essas duas variáveis, muitos pesquisadores, têm feito uso de secadores experimentais de leito fixo, em nível de laboratório, conseguindo maior controle e domínio dessas variáveis (CARLESSO et al., 2005; REIS et al., 2011; FARIA et al., 2012; PRATES et al., 2012; MORAIS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

Carlesso et al. (2005), na secagem em camada delgada de sementes de maracujá, usaram um protótipo de um secador de leito fixo, em que o leito de secagem era constituído por uma bandeja circular com fundo em chapa perfurada, com diâmetro interno de 0,25 m e altura de 0,10 m, tendo um ventilador centrífugo de 1,0 cv, em que a regulagem do fluxo de ar foi realizada por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador e um diafragma com aberturas reguláveis localizado no duto de entrada de ar do ventilador. Como fonte de aquecimento do ar foi empregado um conjunto de resistências elétricas com potência total de 5 kW.

Dentre os secadores experimentais utilizados para o estudo da cinética de secagem de diversos produtos agrícolas, a fonte de aquecimento mais utilizada é a resistência elétrica de troca de calor com o ar. Resistências elétricas de troca de calor com o ar são itens de fácil aquisição, tanto em termos econômicos quanto em disponibilidade no comércio, possuem várias opções de tamanho e potência elétrica, sendo de simples operação, permitindo automatizar o controle de temperatura por diversas formas de controle eletrônico. Devido a esses fatos as resistências elétricas são tão difundidas quando se trata de secadores experimentais (CARLESSO et al., 2005; MONTE et al., 2008; RODRIGUES, 2010; REIS et al., 2011; PRATES et al., 2011; PRATES et al., 2012).

Rodrigues (2010) implementando lógicas de controle de temperatura em um secador experimental de leito fixo, testou o controle liga-desliga e o controle Proporcional Integral Derivativo (PID), verificando que quando utilizou o controle liga-desliga o valor de temperatura não estabilizou no valor desejado, apresentando oscilações na temperatura do ar de secagem. Já o controle PID reduziu as oscilações na temperatura do ar de secagem. Vários pesquisadores que utilizaram de resistências

elétricas para controlar a temperatura do ar em secadores experimentais, também fizeram uso da lógica de controle PID (MONTE et al., 2008; PRATES et al., 2011; REIS et al., 2011).

O controle PID é a combinação de ações de controle proporcional, integral e derivativa para gerar um único sinal de controle (RODRIGUES, 2010). A ação proporcional produz uma saída CV (variável controladora) proporcional à diferença entre o sinal medido (PV - variável de processo) e a referência (SP). Já a ação integral fornece um sinal de saída proporcional à intensidade e ao tempo em que o sinal de erro está presente e o elemento derivativo produz um sinal proporcional à taxa de variação do erro (MONTEIRO, 2002). O erro é conceituado como a diferença entre os valores de PV e SP, sendo PV a grandeza a ser monitorada no processo controlado, o SP o valor em que se deseja manter a grandeza monitorada e a CV é a grandeza a ser controlada no processo.

O fluxo de ar nos secadores experimentais é fornecido por insuflação por meio de ventiladores, geralmente, do tipo centrífugo, sendo que a potência dos ventiladores utilizados varia de 186,5 a 735,5 W (CARLESSO et al., 2005; MONTE et al., 2008; RODRIGUES, 2010; OLIVEIRA et al., 2013).

Para regular o fluxo de ar nos secadores experimentais os pesquisadores usam diafragmas na entrada de ar do ventilador ou inversor de frequência para modular a rotação do motor e, conseqüentemente, controlar a vazão do ventilador, ou ainda, a combinação destes dois dispositivos (CARLESSO et al., 2005; MONTE et al., 2008; RODRIGUES, 2010; PRATES et al., 2011; REIS et al., 2011; FARIA et al., 2012; PRATES et al., 2012; MORAIS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho dimensionar, construir e avaliar um secador experimental, com controle de temperatura e velocidade do ar de secagem, visando estudos de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, e secundariamente a secagem em camada espessa.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto do secador experimental foi dividido em três etapas: dimensionamento da fonte de aquecimento, dimensionamento geométrico da estrutura do secador e seleção do ventilador para atender a demanda operacional do secador. Já a execução foi desenvolvida em duas fases, sendo a primeira a construção da estrutura do secador, realizada na empresa ACM Secadores, situada no município de Dourados/MS e, a segunda, a automação do controle de temperatura e velocidade do ar de secagem fornecido pelo secador experimental, realizada nas dependências da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, nos Laboratórios de Automação Agrícola e, de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

O dimensionamento e o projeto do secador experimental basearam-se no esquema apresentado na Figura 1.

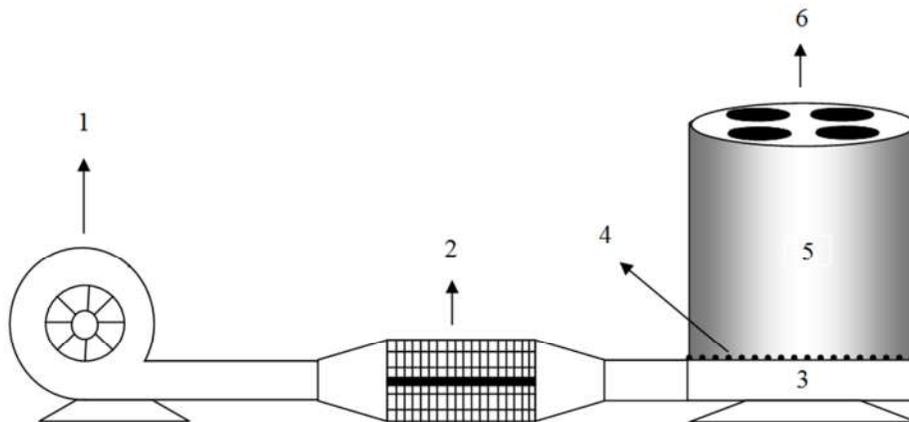


FIGURA 1. Proposta inicial para desenvolver o secador experimental.

O secador idealizado foi composto pelas seguintes partes:

- 1 - Ventilador centrífugo para insuflação de ar;
- 2 - Conjunto de resistências elétricas para aquecimento do ar;
- 3 - Câmara de distribuição de ar (plenum);
- 4 - Chapa perfurada do leito de secagem em camada espessa;
- 5 - Leito de secagem em camada espessa; e

6 - Conjunto de bandejas com malha de ferro para secagem do produto em camada delgada.

O projeto estrutural do secador experimental foi desenvolvido no software AutoCad, versão 2012, no qual foram desenhadas as vistas e o desenho tridimensional de cada componente para, posteriormente, ser construído.

1.2.1 Dimensionamento da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar

Como fonte de aquecimento foi utilizado um conjunto de resistências elétricas, o qual foi dimensionado para fornecer energia ao ar de secagem para que o mesmo atingisse, como condições limites de operação, a temperatura de até 90 °C, com velocidade do ar de até 2 m s⁻¹, em cada bandeja de secagem em camada delgada.

A potência elétrica necessária para o aquecimento do ar de secagem, conforme Park et al. (2007), foi calculada pela Equação 1.

$$P = \dot{m} \Delta h \quad (1)$$

em que:

P: potência elétrica, kW;

\dot{m} : vazão mássica de ar, kg_{ar seco} s⁻¹; e

Δh : variação da entalpia do ar, kJ kg_{ar seco}⁻¹.

A vazão mássica de ar foi determinada por meio da Equação 2.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{V_e} \quad (2)$$

em que:

\dot{Q} : vazão de ar, m³ s⁻¹; e

V_e : volume específico do ar úmido, m³ kg_{ar seco}⁻¹.

A variação de entalpia (Δh) foi calculada pela diferença entre a entalpia do ar de secagem (após a passagem pelas resistências elétricas) e o ar de entrada no secador (ar do ambiente). As propriedades psicrométricas do ar do ambiente e de secagem, considerando a altitude do local, Dourados-MS, de 463 m, foram calculadas pelo programa computacional Grapsi 8.1.1, selecionando a opção processos de aquecimento ou resfriamento.

A vazão mássica, no processo de secagem em camada delgada, foi obtida conhecendo-se a vazão volumétrica total para o processo de secagem, conforme Equação 3.

$$\dot{Q}_{CD} = n_b \ v \ A_b \quad (3)$$

em que:

\dot{Q}_{CD} : vazão de ar demandada na secagem em camada delgada, $m^3 \ s^{-1}$;

n_b : quantidade de bandejas;

v : velocidade do ar de secagem em camada delgada, $m \ s^{-1}$; e

A_b : área de cada bandeja de secagem em camada delgada, m^2 .

Logo o dimensionamento da potência elétrica necessária para aquecer o ar de secagem tem relação direta com a configuração do leito de secagem em camada delgada (quantidade e diâmetro das bandejas), como pode ser observado na Equação 3. Com isso o leito de secagem em camada delgada foi dimensionado observando a potência necessária para aquecer o ar de secagem, selecionando a configuração do leito de secagem que demande uma potência elétrica para o aquecimento do ar condizente com as necessidades e local (laboratório) de pesquisas.

1.2.2 Dimensionamento geométrico do secador

A estrutura do secador experimental (Figura 1) possui elementos de transição (expansões), compartimento para alojar as resistências elétricas, câmara de distribuição de ar e leito de secagem em camada espessa e delgada.

O duto para condução do ar fornecido pelo ventilador até a câmara de distribuição de ar (plenum) possui secção retangular, onde a altura e a largura foram

obtidas de acordo com a altura e número de resistências elétricas selecionadas para aquecer o ar. A altura do duto sendo igual ao comprimento das resistências elétricas, enquanto, a largura, possuindo dimensão suficiente para alojar pelos menos duas resistências elétricas paralelamente.

1.2.2.1 Leito de secagem em camada espessa

O diâmetro do cilindro que constituiu o leito de secagem em camada espessa foi dimensionado em função da quantidade e do diâmetro de bandejas que constituem o leito de secagem em camada delgada. Em que, o diâmetro e a quantidade de bandejas foi selecionado em função do dimensionamento da potência elétrica necessária para aquecer o ar de secagem.

A espessura média da camada recomendada para a secagem em secador de leito fixo, em altas temperaturas, para a maioria dos produtos agrícolas, situa-se na faixa de 40 a 60 cm. A secagem em leito fixo, em altas temperaturas, necessita de revolvimento da massa de produto, para evitar gradientes de teor de água e supersecagem da camada próxima a chapa perfurada (DALPASQUALE et al., 1991; SILVA et al., 2008a). Logo, para facilitar o revolvimento manual do produto, quando proceder a secagem em camada espessa, acrescentou 0,4 m à altura do leito de secagem em camada espessa, adotando assim, 100 cm de altura para o leito de secagem.

1.2.2.2 Câmara de distribuição de ar (Plenum)

Dalpasquale et al. (1991) recomendam para a construção de secadores de leito fixo, que a câmara de distribuição de ar ou plenum possua 50 cm de altura, visando facilitar a manutenção do piso do leito de secagem e do plenum, também, evitando altas perdas de carga, além de possibilitar uma boa distribuição do ar de secagem. Com isso, o plenum do secador experimental atendeu essa especificação.

1.2.2.3 Expansões

Os elementos de transição ou expansões entre a câmara de distribuição de ar de um secador de leito fixo e o ventilador são necessários para uniformizar o fluxo de ar no secador (DALPASQUALE et al., 1991).

As expansões entre o ventilador e a câmara de distribuição de ar foram dimensionadas com o ângulo de abertura do elemento de transição em relação ao eixo de simetria do secador, entre 15 e 45°, para que a perda de carga fosse considerada desprezível (DALPASQUALE et al., 1991).

1.2.2.4 Homogeneizadores

Para homogeneizar o fluxo de ar no duto, entre o ventilador e o plenum, foram instalados no secador homogeneizadores de fluxo, antes e após as resistências elétricas. O homogeneizador implementado antes das resistências elétricas tem a função de homogeneizar a distribuição do ar no duto, para que o mesmo entre em contato com toda a estrutura das resistências elétricas, otimizando a troca de calor entre o ar e as aletas das resistências. Após as resistências, o homogeneizador tem a função de atenuar a turbulência causada no escoamento quando o ar passa pelo conjunto de resistências elétricas, para que entre em um regime mais uniforme na câmara de distribuição de ar.

Um homogeneizador de ar deve ser construído em alvéolos de seção quadrada, em que as dimensões das arestas dos alvéolos podem variar de 7,5 a 15% do diâmetro do duto de ar no qual o mesmo será instalado, e a espessura do homogeneizador deve corresponder a três vezes a dimensão da aresta de um alvéolo do homogeneizador.

Sendo retangular a seção do duto de ar do secador foi necessário determinar o diâmetro equivalente (Equação 4), conforme Stoecker & Jones (1985).

$$D_{eq} = \frac{2 a b}{a + b} \quad (4)$$

em que:

D_{eq} : diâmetro equivalente do duto retangular, m;

a: altura do duto retangular, m; e

b: largura do duto retangular, m.

1.2.2.5 Isolamento térmico

O secador experimental foi projetado para aquecer o ar até 90 °C, sabendo que é possível atingir temperaturas superiores, devido as possibilidades de regulagens do mesmo para operar com baixa velocidade do ar de secagem. Com isso foi necessário selecionar um isolante térmico que, por medidas de segurança, pudesse suportar temperaturas da ordem de 200 °C.

Após a construção da “carcaça” do secador experimental, o mesmo foi revestido com fibra cerâmica como material isolante térmico, com espessura de 51 mm, visando a otimização do calor conduzido, segurança para quem estiver fazendo uso do secador, e até mesmo o conforto térmico do ambiente onde o secador foi alocado. Para fixação do isolante térmico, o mesmo foi instalado entre chapas duplas.

1.2.3 Seleção do ventilador para o secador

O ventilador do secador experimental foi selecionado em função da máxima vazão e pressão estática demandada para a secagem em camada delgada e espessa.

A vazão de ar para a secagem em camada delgada e espessa, foram determinadas pelas Equações 3 e 5, respectivamente. Sendo usado como critério para seleção do ventilador o maior valor de vazão.

$$\dot{Q}_{CE} = A_c \text{ DFA} \quad (5)$$

em que:

\dot{Q}_{CE} : vazão de ar demandada na secagem em camada espessa, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

A_c : área do leito de secagem em camada espessa, m^2 ; e

DFA: densidade de fluxo de ar, $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

A queda de pressão ou pressão estática imposta pelas estruturas do secador (expansões, plenum, e outros) foi desconsiderada, sendo que em um secador

de leito fixo, espera-se que a maior queda de pressão, com exceção da imposta pelo próprio produto a ser seco, seja ocasionada pela chapa perfurada. Segundo Silva et al. (2008b) se a chapa perfurada apresentar pelo menos 10% de área perfurada é desconsiderada a queda de pressão imposta por essa estrutura. Assim foi selecionada uma chapa perfurada que apresentasse no mínimo 10% de área perfurada, para compor o leito de secagem em camada espessa e delgada.

A resistência a passagem do ar imposta pela massa de produto, foi determinada apenas para a secagem em camada espessa, por meio da Equação 6 (Silva et al., 2008b), acrescida de um fator de correção, pois em camada delgada a mesma é desprezível.

$$\Delta P_g = \frac{a \text{ DFA}^2 h_g}{\ln(1 + b \text{ DFA})} \text{ FC} \quad (6)$$

em que:

ΔP_g : queda de pressão devido a resistência do produto, mm.c.a.;

DFA: densidade de fluxo de ar, $\text{m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^2$;

h_g : altura da massa de produto, m;

a, b: constantes dependente dos diversos produtos agrícolas; e

FC: fator de correção (25% para perdas não calculadas e 25% para fator de compactação do produto).

1.2.4 Automação do secador experimental

A automação do secador experimental foi constituída de um painel de comando, para proporcionar o controle automático da temperatura do ar de secagem e possibilitar a variação da rotação do motor do ventilador centrífugo, consequentemente, alterando a vazão/velocidade de ar para a secagem.

No painel de comando foram usados disjuntores e relé térmico como dispositivos de segurança para sobrecargas e curto circuitos, relé falta e sequência de fase para proteger o motor do ventilador em caso de ausência ou inversão de fases na rede de alimentação (motor trifásico). Também foram usados contadores, sinalizadores de indicação de processos e falhas, além de chaves seletoras.

O controle de temperatura do ar de secagem foi baseado em uma lógica de controle Proporcional Integral Derivativo - PID. Foram utilizados os seguintes componentes: controlador de temperatura que possibilitasse utilização de controle PID, módulo de controle de potência de cargas resistivas e um sensor de temperatura.

O processo de controle automático (Figura 2) foi projetado para responder à perturbações ou distúrbios ocasionados por variações de temperatura do ar ambiente e de fluxo de ar durante o processo de secagem, no qual o processo de controle deverá contornar esses distúrbios.

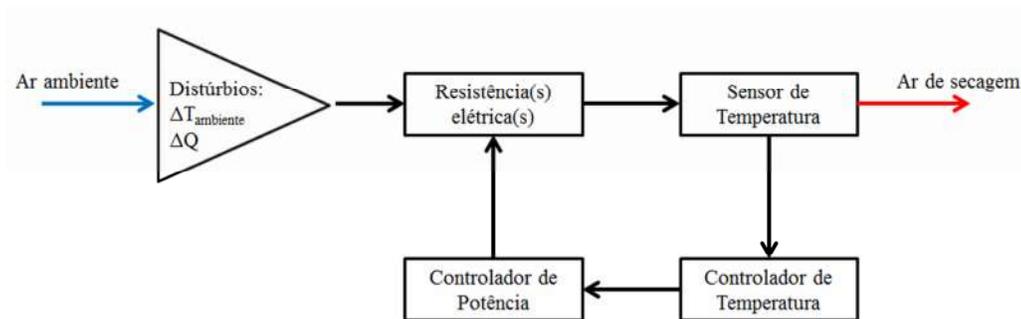


FIGURA 2. Diagrama do processo de controle de temperatura do ar de secagem.

Para regular o fluxo do ar de secagem foi selecionado um inversor de frequência para atender as necessidades do motor do ventilador centrífugo selecionado, possibilitando a variação da rotação do eixo do motor e, conseqüentemente, a vazão fornecida durante o processo de secagem.

1.2.5 Teste de validação do secador experimental

Após a montagem do secador experimental foram realizados alguns testes com o secador a vazio, como: distribuição de ar e de temperatura nas bandejas para secagem em camada delgada; eficácia do isolamento térmico; e a capacidade do secador experimental fornecer calor ao ar de secagem para que atinja a temperatura de 90 °C com velocidade de 2 m s⁻¹.

Para fazer a verificação dos parâmetros, o secador foi regulado em diferentes condições de velocidade (0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹) e de temperatura do ar de secagem (40, 65 e 90 °C). As medições de cada parâmetro foram realizadas em intervalos de 20 minutos durante 2 horas.

A distribuição de ar, entre as bandejas, foi verificada utilizando um termo anemômetro de pás rotativas, da marca Instrutherm, modelo TAD 500 (Figura 3), com precisão de $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$. Juntamente com a verificação da distribuição de ar nas bandejas foi verificada a temperatura do ar, em cada bandeja, utilizando termômetros de mercúrio, graduados de -10 à $210 \text{ }^\circ\text{C}$.



FIGURA 3. Verificação da velocidade do ar nas bandejas de secagem em camada delgada.

Para verificar a eficácia do isolamento térmico foi fixado na estrutura do secador um par de termômetros digitais, sendo um deles no corpo do secador, onde há isolamento térmico (Figura 4, A), e outro no suporte para as bandejas de secagem em camada delgada, onde não há isolamento térmico (Figura 4, B).

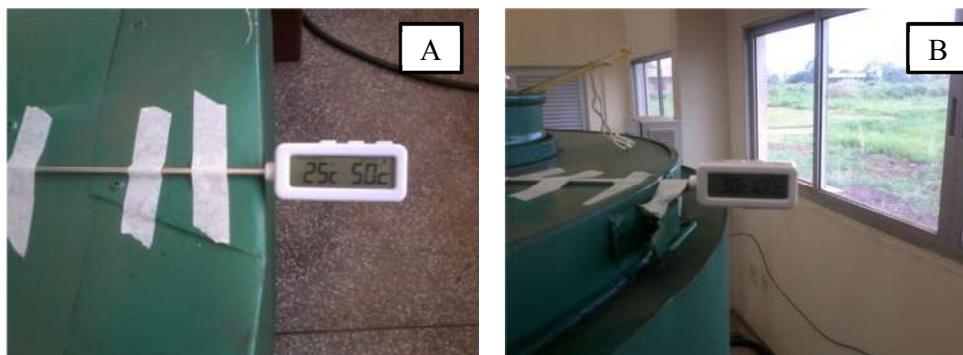


FIGURA 4. Medição da temperatura da superfície do secador com isolante térmico (A) e sem isolante térmico (B).

Após os testes a vazio foram realizados ensaios de secagem de produtos agrícolas, também com o intuito de comprovar o funcionamento do secador em

camada delgada e espessa. Para verificar o funcionamento do secador experimental em camada delgada realizou-se a secagem de folhas de guavira [*Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg] em quatro condições de temperatura (40, 50, 60 e 70 °C) e duas velocidades do ar de secagem (0,4 e 1,2 m s⁻¹), e também, a secagem de sementes de soja em cinco condições de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e três velocidades do ar de secagem (0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹).

Os processos de secagem, para ambos os produtos, foram realizados em duas bandejas do secador experimental. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, utilizando uma balança analítica digital com resolução de 0,01 g, para acompanhar a variação do teor de água. Para calcular a razão de umidade (RU), nas diferentes temperaturas de secagem, utilizou-se a Equação 7:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (7)$$

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto em um determinado tempo, 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..

Aos dados de razão de umidade, obtidos experimentalmente durante a secagem das folhas de guavira e de sementes de soja, foram ajustados modelos matemáticos para predizer o fenômeno da secagem de produtos agrícolas.

Para avaliar o secador experimental na secagem em camada espessa realizou-se a secagem de sementes de soja em cinco condições controladas de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C), com a densidade de fluxo de ar de secagem de 0,20 m³ s⁻¹ m².

As sementes de soja foram secas até atingirem o teor de água de aproximadamente 0,16 decimal b.s.. Para acompanhar a variação do teor de água das sementes de soja durante a secagem, foram colocadas amostras de sementes de soja em cinco embalagens teladas, e espalhadas na camada espessa de sementes, em que cada embalagem consistiu em uma repetição. Sendo acompanhada a variação da

massa, do conteúdo das embalagens, durante a secagem. Conhecendo-se o teor de água inicial do produto e a variação de massa em determinado instante, determinava-se o teor de água daquele produto no dado instante.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 é mostrado um desenho tridimensional do secador experimental projetado, o qual será discutido cada etapa do dimensionamento e construção do mesmo a seguir.

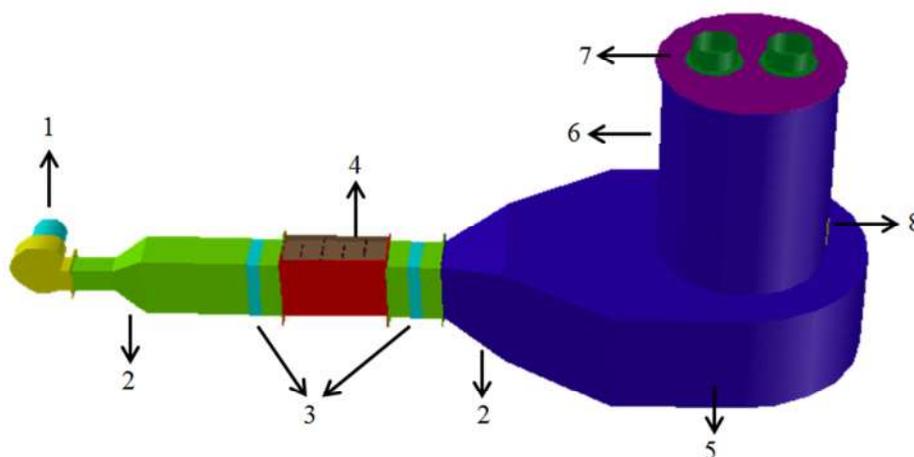


FIGURA 5. Representação tridimensional do secador experimental projetado.

O secador experimental projetado é composto pelas seguintes partes:

- 1 - Ventilador centrífugo para insuflação de ar;
- 2 - Expansões ou elementos de transição;
- 3 - Homogeneizadores de fluxo de ar;
- 4 - Conjunto de resistências elétricas;
- 5 - Câmara de distribuição de ar (plenum);
- 6 - Leito de secagem em camada espessa;
- 7 - Conjunto de bandejas com malha de ferro para secagem do produto em camada delgada; e
- 8 - Porta para descarregar o produto do leito de secagem em camada espessa.

Nos itens a seguir são ilustradas as vistas do secador experimental projetado, sendo os valores cotados nestas vistas em milímetros (mm). E a estrutura

do secador experimental, apresentada em fotos, foi montada com chapas de ferro n.º 14 (2 mm de espessura).

1.3.1 Cálculo da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar

Para calcular a potência elétrica necessária para o aquecimento do ar foi necessário conhecer a variação de entalpia (Equação 1), a qual é dependente das condições do ar ambiente e do ar aquecido. Analisando o estudo realizado por Schneider & Silva (2012), sobre a dinâmica climática de Dourados/MS, é possível adotar como valores médios de temperatura e umidade relativa 20 °C e 70%, respectivamente.

Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades psicrométricas do ar ambiente (ar de entrada) e do ar de secagem (ar de saída) envolvidos no cálculo da potência elétrica necessária para o aquecimento do ar. A variação de entalpia para aquecer o ar de entrada à 90 °C é de 71,76 kJ kg_{ar seco}⁻¹.

TABELA 1. Propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar de secagem, para a cidade de Dourados/MS, considerando altitude local de 463 m.

	Ar ambiente	Ar de secagem
Temperatura (°C)	20	90
Umidade relativa (%)	70	2,34
Entalpia específica (kJ kg _{ar seco} ⁻¹)	47,52	119,28
Volume específico (m ³ kg _{ar seco} ⁻¹)	0,89	1,10

Na Tabela 2 são apresentados os valores de potência elétrica, calculado conforme equação 1, para diferentes configurações do leito de secagem em camada delgada, considerando a temperatura final de 90 °C e velocidade de saída do ar de secagem de 2 m s⁻¹ em cada bandeja, sendo analisadas duas combinações de diâmetro de bandejas com quatro quantidades diferentes de bandejas. A variável vazão mássica (Equação 2) é a razão entre a vazão do ar de secagem e o volume específico do ar de entrada.

TABELA 2. Simulação da potência elétrica demandada em função da quantidade e diâmetro das bandejas para a secagem em camada delgada.

Velocidade (m/s)	Diâmetro (cm)	Quantidade de bandejas	Vazão de ar (m ³ /s)	Vazão Mássica (Kg _{ar seco} s ⁻¹)	Potência (kW)
2,0	25	4	0,39	0,44	31,66
2,0	25	3	0,29	0,33	23,75
2,0	25	2	0,20	0,22	15,83
2,0	25	1	0,10	0,11	7,92
2,0	20	4	0,25	0,28	20,26
2,0	20	3	0,19	0,21	15,20
2,0	20	2	0,13	0,14	10,13
2,0	20	1	0,06	0,07	5,07

Analisando a Tabela 2, pode-se observar como a variação da quantidade e do diâmetro das bandejas tem forte influência na potência elétrica demandada para aquecer o ar de secagem.

O secador experimental foi projetado para ser alocado em um laboratório de pesquisas de secagem e armazenamento de produtos agrícolas, sendo que neste tipo de laboratório há diversos equipamentos com diferentes potências elétricas. Com isso houve a necessidade de dimensionar a potência elétrica para o secador experimental que permita o seu funcionamento simultaneamente com os demais equipamentos, sem que ocasione riscos de sobrecarga das instalações elétricas do laboratório. Outro ponto importante, é que quanto maior a potência elétrica dimensionada, maior é o custo de aquisição dos componentes para a montagem do painel de comando do secador experimental.

Levando em consideração as ponderações feitas anteriormente, optou-se por um leito de secagem em camada delgada com duas bandejas de 20 cm de diâmetro cada, o que correspondeu a uma potência elétrica de pelo menos 10,13 kW (Tabela 2). Assim também, reduz-se consideravelmente o número de vezes em que uma condição (temperatura e velocidade do ar de secagem) tem de ser testada para se obter um número de repetições satisfatório.

Os leitos de secagem, em camada delgada, dos secadores experimentais utilizados em pesquisas são bem variados com relação ao tamanho, quantidade de bandejas e forma. A maioria dos secadores são com bandejas circulares dispostas radialmente, como o secador experimental utilizado por Carlesso et al. (2005) que possuía como leito de secagem em camada delgada uma bandeja circular com diâmetro de 25 cm e altura de 10 cm. O secador experimental automatizado por Monte et al. (2008) também possuía uma única bandeja circular, já o secador

experimental utilizado por Morais et al. (2013) possuía três bandejas circulares com 9 cm de diâmetro e o utilizado por Oliveira et al. (2013), também, três bandejas, mas com diâmetro de 23 cm e 5 cm de altura.

Há secadores com bandejas de secção retangular, dispostas em uma coluna vertical, uma sobre a outra, como o secador utilizado por Coradi et al. (2014) o qual possuía como leito de secagem cinco bandejas retangulares de 25 x 25 x 15 cm. Outro exemplo é o secador em que Rodrigues (2010) implementou automação do controle de temperatura e fluxo de ar de secagem, o qual possuía três bandejas em formato retangular de 27 x 27 x 8,5 cm.

Leitos de secagem em camada delgada, constituído por bandejas sobrepostas em coluna vertical podem descaracterizar a curva de secagem de produtos agrícolas, pois no início da secagem, momento em que o produto possui teor de água mais elevado, o ar de secagem, ao passar pela primeira bandeja promove uma transferência simultânea de calor e massa com o produto, perdendo energia e arrastando vapor d'água, reduzindo o seu potencial de secagem a medida que vai passando pelas bandejas superiores.

Realizada a seleção da configuração do leito de secagem em camada delgada, foi montado um conjunto de seis resistências elétricas aletadas de troca de calor com ar de 2000 W cada, totalizando 12 kW de potência, em que cada componente apresenta comprimento de 30 cm e tensão de alimentação de 220 V (Figura 6).



FIGURA 6. Resistência elétrica aletada de troca de calor com o ar.

As Figuras 7 e 8 ilustram as vistas do compartimento em que foram alocadas as resistências elétricas e o compartimento com as resistências elétricas instaladas, respectivamente.

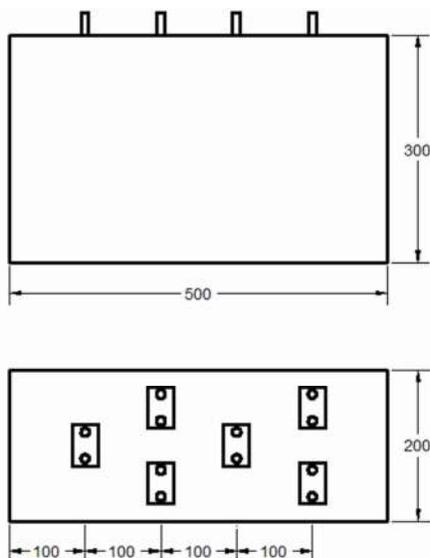


FIGURA 7. Vista frontal e superior do conjunto de resistências elétricas.



FIGURA 8. Conjunto de resistências elétricas instaladas no secador experimental.

As dimensões (largura e altura) do duto de ligação entre o ventilador e o plenum do secador experimental foram as mesmas do compartimento utilizado para alocar as resistências elétricas, ou seja, 30 cm de altura e 20 cm de largura (Figura 7).

O conjunto de resistências elétricas montado (12 kW) apresenta uma potência 18,5% superior ao dimensionado (10,13 kW), oferecendo ao sistema de aquecimento uma margem de segurança quanto a disponibilidade de potência elétrica necessária para o aquecimento do ar de secagem.

1.3.2 Dimensionamento geométrico do secador

1.3.2.1 Leito de secagem em camada delgada e espessa

O leito de secagem em camada delgada, projetado de acordo com o cálculo da potência elétrica necessária, é composto de duas bandejas de 20 cm de diâmetro cada (Figura 9). Contudo, optou-se por construir dois conjuntos de leito de secagem em camada delgada, um com duas e outro com quatro bandejas, pois outra possibilidade de ter um número razoável de repetições em uma única condição (temperatura e velocidade do ar de secagem) foi o de construir um conjunto com quatro bandejas. A utilização deste leito com quatro bandejas é possível quando proceder à secagem com uma combinação de temperatura e velocidade do ar que não extrapole a potência ofertada pelo conjunto de resistências elétricas (12 kW).



FIGURA 9. Bandeja do leito de secagem em camada delgada.

Sendo o leito de secagem em camada delgada composto por duas ou quatro bandejas de 20 cm de diâmetro, logo o diâmetro mínimo adequado do leito de secagem em camada espessa para dispor as bandejas que compõem o leito de secagem em camada delgada deveria ser de 60 cm. Pensando-se na qualidade da secagem em camada espessa, a qual é influenciada, principalmente, pela espessura da camada de produto, adotou-se o diâmetro de 80 cm, o que resulta numa menor espessura para a camada de produto (Tabela 3).

TABELA 3. Espessura da camada de soja (massa específica aparente de 772 kg m^{-3}) em função da massa de produto e do diâmetro do leito de secagem (D).

Produto	Massa (kg)	Espessura da camada (cm)	
		Opção 1 (D = 60 cm)	Opção 2 (D = 80 cm)
Soja	60	27,5	15,5
	120	55,0	30,9
	180	82,5	46,4
	240	110,0	61,8

Como pode ser observado na Tabela 3, exemplificado com a soja, nota-se que o aumento do diâmetro do leito de secagem em camada espessa de 60 para 80 cm reduziu a espessura da camada em aproximadamente 43,7%, o que proporciona menor possibilidade de gradientes de teor de água no produto após a secagem e supersecagem da camada mais próxima a chapa perfurada, na secagem em altas temperaturas.

Com isso optou-se pelo diâmetro do leito de secagem em camada espessa de 80 cm. Na Figura 10 está ilustrado o leito de secagem em camada delgada, e nas Figuras 11, 12 e 13 está ilustrado a vista frontal, superior e o interior do leito de secagem em camada espessa.

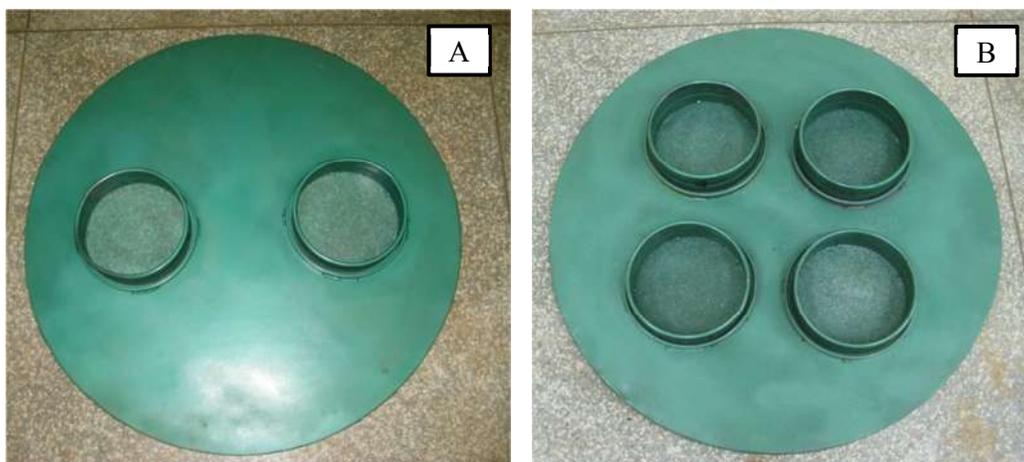


FIGURA 10. Leito de secagem em camada delgada com duas bandejas (A) e com quatro bandejas (B).

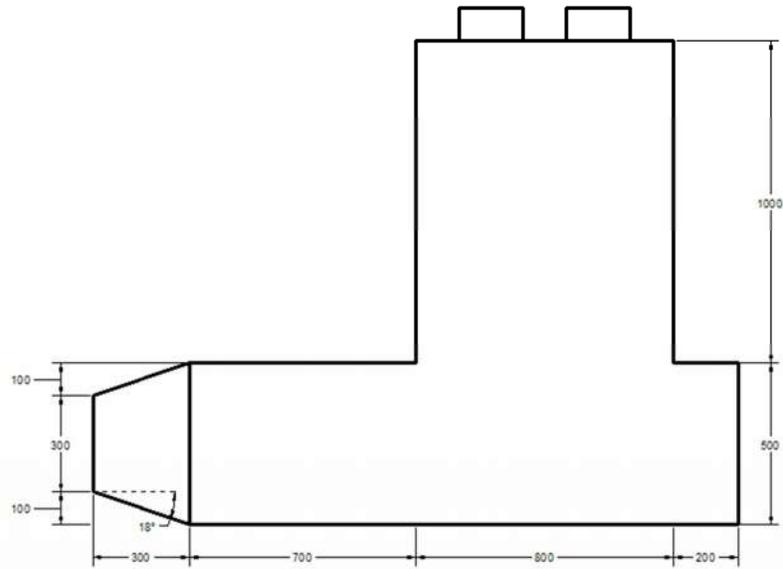


FIGURA 11. Vista frontal dos leitos de secagem em camada delgada e espessa.

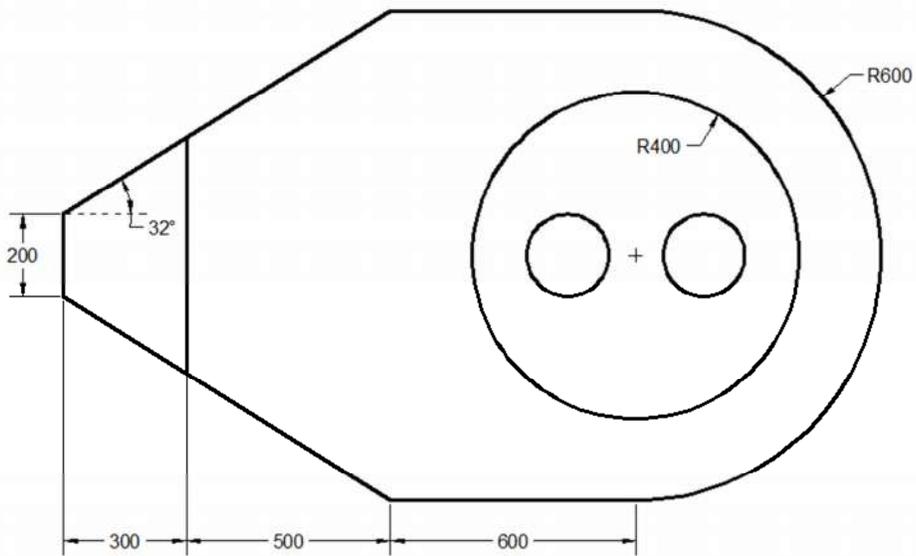


FIGURA 12. Vista superior dos leitos de secagem em camada delgada e espessa.



FIGURA 13. Interior do leito de secagem em camada espessa.

A chapa perfurada do leito de secagem em camada espessa foi construída a partir de uma malha com furos circulares de diâmetro médio de 0,19 cm, totalizando uma área perfurada de 33,97% (Figura 14). As bandejas de secagem em camada delgada também foram construídas com essa mesma malha (Figura 9).



FIGURA 14. Chapa perfurada do leito de secagem em camada espessa.

Para facilitar a descarga de produto agrícola quando realizado a secagem em camada espessa, foi implementado no leito de secagem em camada espessa, uma “porta de descarga”, conforme ilustrado na Figura 15.



FIGURA 15. Porta para descarregar produto do leito de secagem em camada espessa.

1.3.2.2 Plenum e expansões

A câmara de distribuição de ar (plenum) foi construída com 50 cm de altura conforme recomendado por Dalpasquale et al. (1991), como pode ser observado na Figura 11.

O secador experimental, como pode ser observado na Figura 5, possui uma expansão logo após o ventilador (Figura 16) e outra antes do plenum (Figuras 11 e 12), sendo estas expansões projetadas com ângulos entre 15 e 45° conforme recomendado por Dalpasquale et al. (1991).

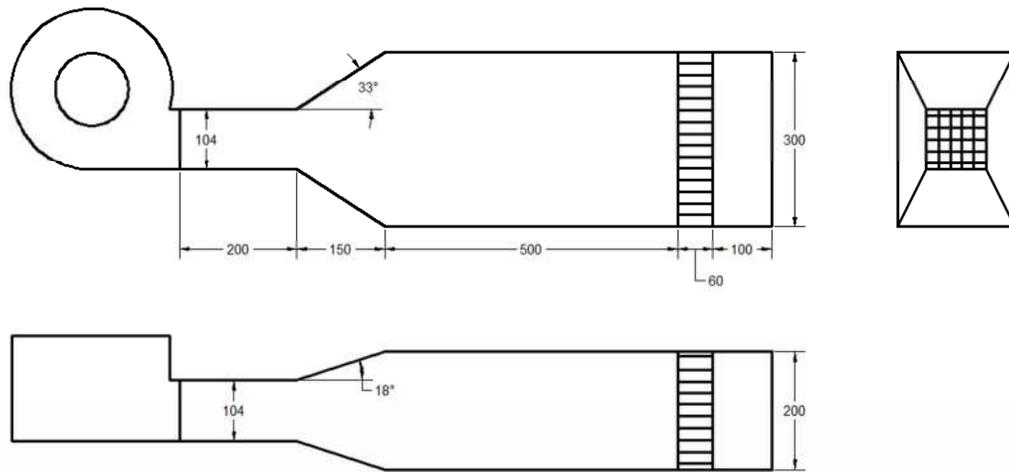


FIGURA 16. Expansão e homogeneizador de ar logo após o ventilador.

1.3.2.3 Homogeneizadores

Aplicando a Equação 4, obteve-se o diâmetro equivalente a 24 cm para a secção do duto, logo os alvéolos do homogeneizador poderiam possuir arestas de 1,8 à 3,6 cm (7,5 a 15% do diâmetro do duto). Por praticidade de construção, adotaram-se as arestas dos alvéolos de 2,0 cm. Conseqüentemente, a espessura desses homogeneizadores foi de 6,0 cm (três vezes o comprimento da aresta do homogeneizador).

As vistas dos homogeneizadores de ar localizado antes e após o conjunto de resistências elétricas são mostradas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

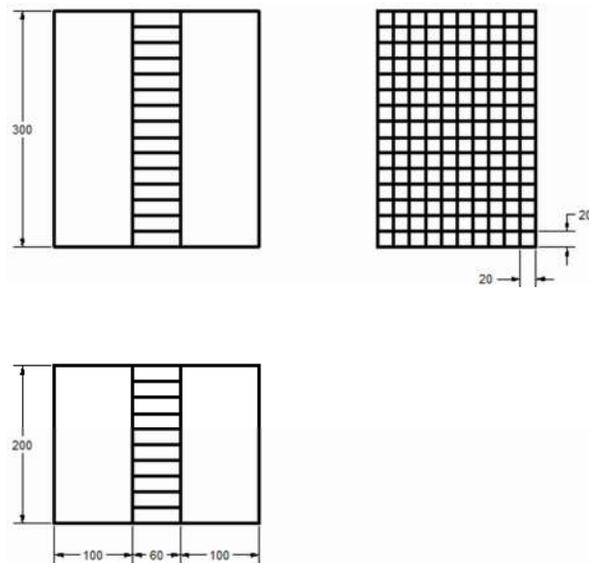


FIGURA 17. Vistas do homogeneizador de ar após o conjunto de resistências elétricas.

É mostrado na Figura 18 o homogeneizador de ar construído, o qual foi implementado após o conjunto de resistências elétricas. Sendo que o homogeneizador implementado antes do conjunto de resistências elétricas possui as mesmas dimensões.



FIGURA 18. Homogeneizador de ar após o conjunto de resistências elétricas.

Oliveira et al. (2013) secando a parte aérea de *P. brevipedunculata*, em um secador experimental, fez uso de esferas de vidro para diminuir a turbulência e uniformizar a velocidade do ar antes do mesmo passar pelo leito de secagem.

1.3.2.4 Isolamento térmico

Isolantes térmicos que suportam temperaturas da ordem de 200 °C são fáceis de encontrar no comércio, sendo os mais populares a lã de vidro e lã de rocha. No presente trabalho, foi utilizado o isolante térmico de fibra de cerâmica (DICKSON REFRAATÓRIOS E ISOLAMENTOS LTDA, 2013), o qual suporta temperaturas de até 1260 °C, com espessura de 51 mm e densidade de 128 kg m⁻³. Este isolante térmico foi utilizado devido as suas especificações atenderem com folga as necessidades de projeto, e também devido a facilidade comercial local para aquisição do mesmo.

Após a construção de toda a estrutura do secador experimental (Figura 19) o mesmo foi todo revestido com isolante térmico, com exceção do trecho entre o ventilador e o conjunto de resistências elétricas.



FIGURA 19. Estrutura do secador experimental concluída, ausente apenas o isolamento térmico.

Para fixar o isolante térmico na estrutura do secador o mesmo foi revestido com chapas metálicas, conforme ilustrado na Figura 20.



FIGURA 20. Revestimento com isolante térmico na estrutura do secador experimental.

Os secadores experimentais utilizados por Carlesso et al. (2005) e Oliveira et al. (2013) foram construídos em chapas duplas recheados com material isolante térmico.

1.3.3 Seleção do ventilador para o secador

Na Tabela 4 são apresentados os valores máximos de vazão de ar demandada no processo de secagem em camada espessa e delgada.

TABELA 4. Vazão máxima de ar demandada para a secagem.

Vazão de ar demandada ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)		
Camada delgada		Camada espessa
Conjunto com 2 bandejas	Conjunto com 4 bandejas	
7,54	15,08	7,54

Analisando a secagem em camada delgada, na situação em que se exige maior vazão de ar para secagem, obtém-se a vazão de $15,08 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$, sendo que para a secagem em camada delgada são desprezíveis as quedas de pressão impostas pelas estruturas do secador e pela camada de produto, devido à espessura ser a mais fina possível. Com isso deverá ser selecionado um ventilador que possa fornecer a vazão de ar de até $15,08 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$.

Já para a secagem em camada espessa (Tabela 4) nota-se que a vazão máxima de ar é de $7,54 \text{ m}^3 \text{min}^{-1}$. Mas, tratando-se de camada espessa, deve ser considerada a resistência a passagem do ar imposta pela massa de produto. Observando a Figura 21, nota-se que dentre os principais produtos agrícolas o que oferece maior resistência à passagem do ar é o trigo, logo, o cálculo da queda de pressão foi realizado para esse produto.

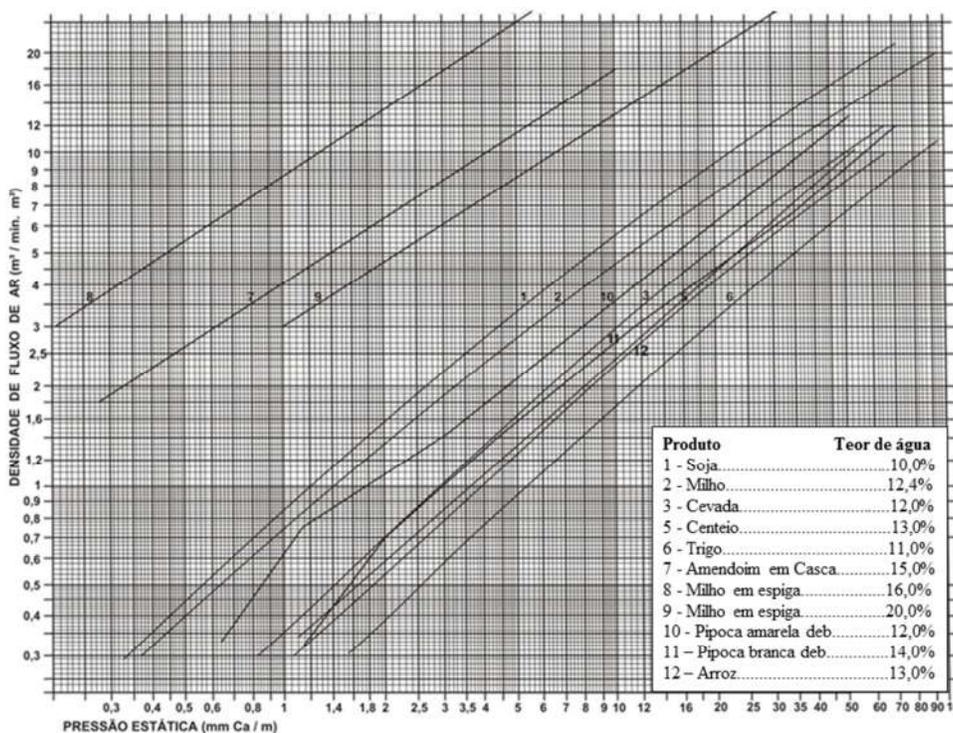


FIGURA 21. Gráfico de Sheed para determinação da pressão estática imposta pelos principais produtos agrícolas.

Fonte: Adaptado de ASABE (2007).

A queda de pressão imposta pelo trigo foi calculada de acordo com a Equação 6, sendo os valores do coeficientes “a” e “b” iguais a 0,825 e 0,164, respectivamente (ASABE, 2007). Na Tabela 5 é apresentado o valor da queda de pressão calculada para o trigo para alguns valores de espessura de camada e densidade de fluxo de ar recomendado para secagem de produtos agrícolas em secadores estacionários (DALPASQUALE et al., 1991).

TABELA 5. Queda de pressão (ΔP) devido a diferentes densidades de fluxo de ar (DFA) e espessuras de camada de trigo.

DFA ($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$)	Vazão de ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	Espessura da camada (m)	ΔP (mm.c.a.)
7,20	3,62	0,40	34,23
		0,50	42,78
		0,60	51,34
9,00	4,52	0,40	45,99
		0,50	57,49
		0,60	68,99
12,00	6,03	0,40	68,14
		0,50	85,18
		0,60	102,21
15,00	7,54	0,40	93,32
		0,50	116,64
		0,60	139,97

De posse dos valores de máxima vazão de ar demandada nos processos de secagem em camada delgada e espessa (Tabela 4), e da queda de pressão imposta pela massa de produto (Tabela 5), foi selecionado o ventilador Siroco, modelo VSI-160, do fabricante Ibram (IBRAM, 2013). Na Figura 22 é apresentada a curva do ventilador siroco VSI-160 do fabricante Ibram (IBRAM, 2013).

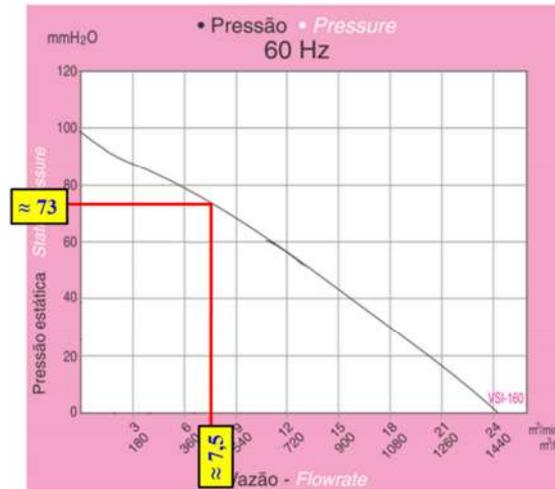


FIGURA 22. Curva do Ventilador Siroco VSI-160.
Fonte: Adaptado de IBRAM (2013).

Como pode ser observado na Tabela 5 e Figura 22, para os valores de densidade de fluxo de ar de 15 e 12 m³ min⁻¹ m⁻², no caso de secagem de trigo, deverão ser utilizadas camadas de trigo de aproximadamente 31 e 45 cm, respectivamente, devido a queda de pressão imposta pelo produto nestes fluxos de ar. Já para os demais valores de densidade de fluxo de ar, mostrados na Tabela 5, é possível secar trigo com as espessuras recomendadas nessa tabela. Para os outros produtos agrícolas, os quais apresentam menor resistência à passagem de ar do que o trigo é possível usar camadas mais espessas para as maiores densidades de fluxo de ar.

Na Figura 23 é apresentado o ventilador Siroco do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui motor de 1 cv, com 3425 r.p.m. de rotação, vazão máxima de 24,6 m³ min⁻¹ e pressão estática máxima de 99 mm.c.a..



FIGURA 23. Ventilador Siroco, fabricante Ibram, modelo VSI-160.

Deste modo, o ventilador selecionado atende as condições de secagem em camada delgada satisfatoriamente e, para a camada espessa com mínimas limitações, no caso de secagem de produtos que ofereçam resistência a passagem do ar elevada como o trigo.

1.3.4 Automação do secador experimental

Para o controle de temperatura e seleção da velocidade do ar foi desenvolvido um painel de comando, o qual é constituído por um circuito principal ou de força (Figura 24) e um circuito de comando (Figura 25).

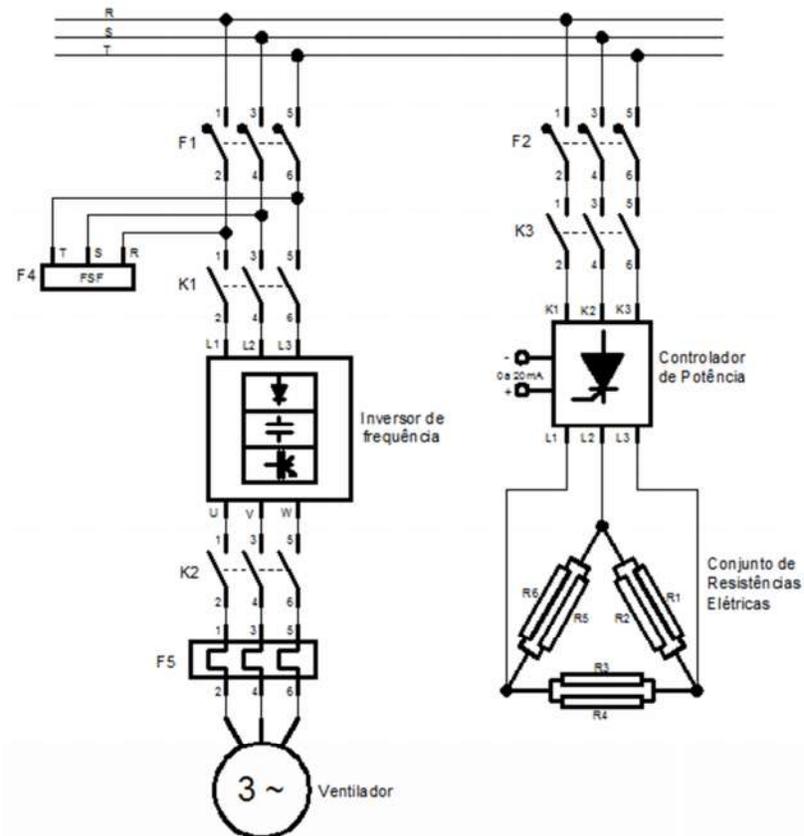


FIGURA 24. Circuito principal ou de força do painel de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem.

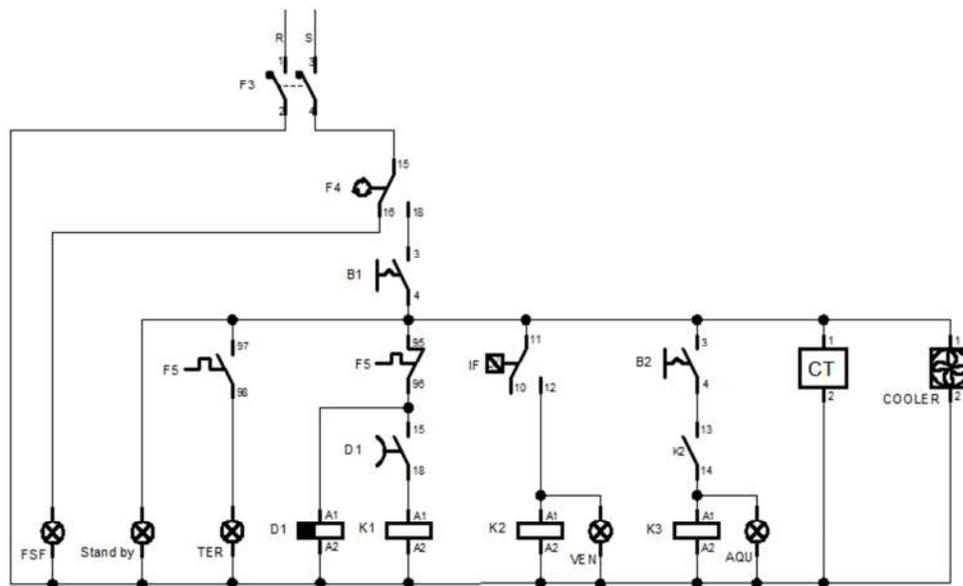


FIGURA 25. Circuito de comando do painel de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem.

O circuito de força tem como componentes principais um inversor de frequência, da marca WEG, modelo CFW 08 (WEG, 2013), para motores elétricos de até 1 cv, e um Controlador de Potência, marca Novus, modelo PCW-3P-60 (NOVUS, 2013a).

No circuito de força (Figura 24) foram previstos disjuntores, com a função de proteger o circuito do inversor de frequência do motor do ventilador (F1) e o circuito do controlador de potência do banco de resistências elétricas (F2) de curtos circuitos e sobrecorrentes. No circuito de força nota-se o uso de um relé térmico (F5) no circuito do inversor de frequência do motor do ventilador, para proteger o mesmo de uma sobrecorrente.

Para monitorar a alimentação do painel de controle foi instalado um relé falta e sequência de fase (F4), que no caso de falta de uma fase ou alteração na sequência das fases, que poderia danificar ou causar funcionamento inadequado do sistema de insuflação de ar ou aquecimento; desenergiza todo o comando do painel de controle, protegendo assim o inversor de frequência, o motor do ventilador e o controlador de potência.

A energização e desenergização do inversor de frequência e do controlador de potência ficaram condicionados a comutação das contadoras K1 e K3, respectivamente. Já a energização e desenergização do motor do ventilador está condicionado a comutação da contadora K2, a qual a está condicionada ao fechamento dos contatos normalmente abertos, 11-12, do inversor de frequência quando o mesmo é ligado pressionando a tecla “I” em sua interface de controle.

O controlador de potência tem a função de controlar a potência disponibilizada ao conjunto de resistências elétricas. O controle da potência disponibilizada pelo controlador de potência é realizado por meio da recepção de um sinal de controle de 4 a 20 mA em seus terminais de comando. As resistências elétricas, alimentadas pelo controlador de potência, foram dispostas em uma configuração trifásica, ligadas em pares na formação de triângulo, fazendo com que o sistema de cargas resistivas fique equilibrado em cada “vértice do triângulo”, permitindo assim a disponibilização da carga em níveis controlados em seus terminais.

O conjunto de resistências elétricas deve trabalhar com sistema de ventilação forçada, ou seja, não devem ser acionadas se o ventilador não estiver ligado. Para evitar este tipo de problema foi inserido um inter-travamento elétrico,

fazendo uso dos contatos normalmente abertos da contatora K2 (13-14) para que o sistema de aquecimento somente seja ligado caso o ventilador esteja em funcionamento.

No circuito de comando (Figura 25) do painel de controle do secador experimental a chave seletora B1 é responsável por energizar e desenergizar todo o painel de controle, enquanto as teclas “I” e “0” da interface de controle do inversor de frequência são responsáveis pelo seu acionamento e desligamento e, conseqüentemente do motor do ventilador. Já a chave seletora B2 é responsável por energizar e desenergizar a contatora K3 e, conseqüentemente, o controlador de potência e o conjunto de resistências elétricas.

Ao colocar a chave seletora B1 na posição ligada, o relé de tempo D1 é energizado, o qual atrasa a comutação da contatora K1 em 40 s, e o mesmo acontece no caso do sistema estar em pleno funcionamento e haver uma falha na alimentação do mesmo, para que na retomada do sistema o inversor de frequência não seja iniciado imediatamente, garantido que o mesmo volte a operar normalmente após ser desenergizado, conforme recomenda Rodrigues (2010).

O painel de controle montado com base nos circuitos de força e comando das Figuras 24 e 25 são mostrados nas Figuras 26 e 27.

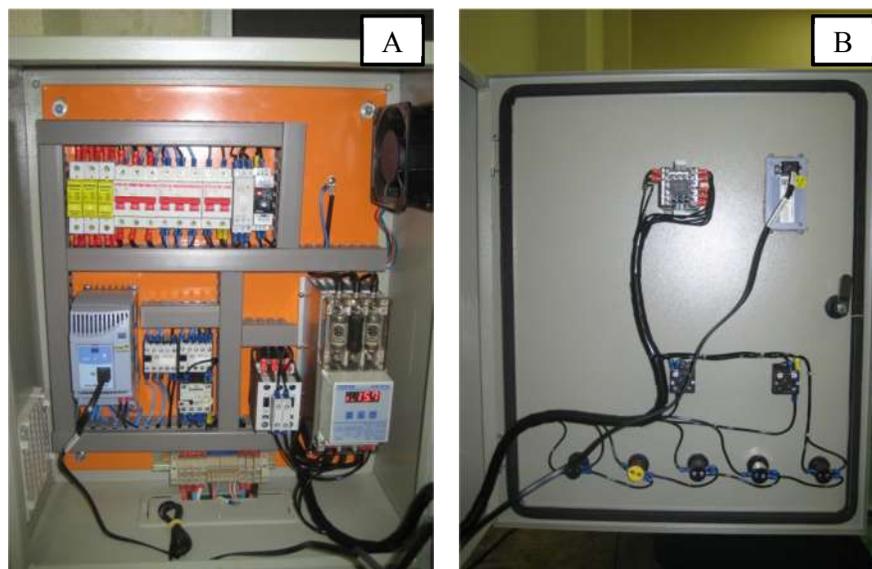


FIGURA 26. Vista interna (A) e da tampa (B) do painel de controle de temperatura e de velocidade do ar de secagem do secador experimental.

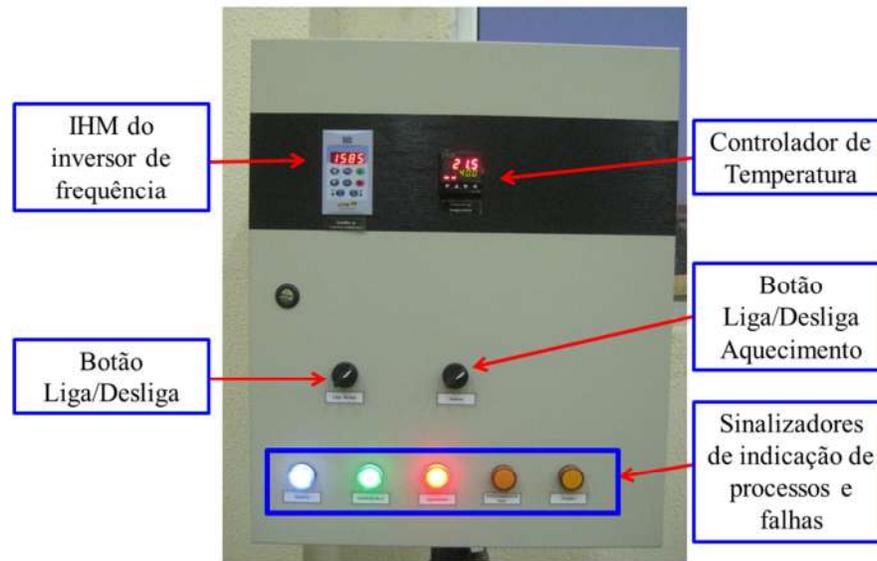


FIGURA 27. Vista frontal do painel de controle do secador experimental.

Como pode ser observado nas Figuras 25 e 26 foi instalado um cooler no painel de controle para fazer a exaustão do calor dissipado pelo inversor de frequência e pelo controlador de temperatura, visando a conservação e o bom funcionamento destes componentes.

O controlador de temperatura utilizado foi o N1200, da marca Novus (NOVUS, 2013b), sendo este componente o “cérebro” do processo de controle de temperatura. O controlador de temperatura utilizado trabalha com lógica de controle PID, que ao receber do sensor de temperatura a temperatura instantânea do processo, faz a comparação com o valor de temperatura programado (SP), realiza as ações de controle PID e, gera o sinal de controle variável (4 a 20 mA) para o controlador de potência para que o mesmo forneça a potência adequada para que as resistências elétricas aqueçam o ar de secagem conforme o programado, sendo essa ação contínua durante todo o processo de secagem, mantendo a temperatura programada constante.

O painel de controle do secador experimental (Figura 27) possui sinalizadores de indicação de processos e falhas, indicando quando o painel está energizado (pronto para o funcionamento); que a ventilação e o aquecimento estão em funcionamento; e ainda indicam falhas referentes a sobrecorrente do motor do ventilador e falta e sequência de fase.

O sensor de temperatura utilizado para medir a temperatura do ar de secagem foi um pt 100 (termorresistência), o qual apresenta uma faixa de trabalho de

-200 a 650 °C, possuindo uma haste de comprimento de 50 cm. O sensor de temperatura é acoplado ao secador por meio de rosca de ½”, sendo possível acoplar o sensor de temperatura nos dois possíveis pontos de leitura de temperatura, sendo esses pontos o mais próximo possível do leito de secagem em camada delgada e espessa, conforme ilustrado nas Figuras 28 e 29, respectivamente.



FIGURA 28. Posição do sensor de temperatura para secagem em camada delgada no secador experimental.



FIGURA 29. Posição do sensor de temperatura para secagem em camada espessa no secador experimental.

Na Figura 30 é mostrado o secador experimental concluído e alocado no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas da Universidade Federal da Grande Dourados.



FIGURA 30. Secador experimental para secagem em camada delgada e espessa de produtos agrícolas.

Observando a Figura 30, na qual é apresentado o secador já construído, e as Figuras 5, 7, 11, 12 e 16 que compõem o projeto, nota-se que o secador experimental foi construído conforme o projeto elaborado.

1.3.5 Teste de validação do secador experimental

Na Tabela 6 são apresentadas as temperaturas (T_1 e T_2 , em $^{\circ}\text{C}$) e velocidades (V_1 e V_2 , em m s^{-1}) do ar, verificadas a cada 20 minutos durante duas horas, nas bandejas 1 e 2 do secador experimental, quando o mesmo foi regulado para as temperaturas de 40, 65 e 90 $^{\circ}\text{C}$ e velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s^{-1} .

TABELA 6. Temperaturas (T1 e T2), em °C, e velocidades do ar de secagem (V1 e V2), em m s⁻¹, nas bandejas 1 e 2 do secador experimental para diferentes condições de ar de secagem.

Tempo (min)	0,4 m s ⁻¹		1,2 m s ⁻¹		2,0 m s ⁻¹		0,4 m s ⁻¹		1,2 m s ⁻¹		2,0 m s ⁻¹	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	V1	V2	V1	V2	V1	V2
40 °C												
0	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	41,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	40,0	40,0	40,5	41,0	40,5	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	40,0	40,0	40,0	40,5	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
65 °C												
0	65,0	65,0	65,0	65,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	65,0	65,0	66,0	65,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	65,0	65,0	67,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	65,0	65,0	66,0	65,0	66,5	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	65,0	65,0	67,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	65,0	65,0	66,0	66,0	66,0	66,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	65,0	65,0	66,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
90 °C												
0	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	93,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	90,0	90,0	93,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	93,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0

Notou-se boa distribuição de ar nas bandejas, independente da velocidade do ar de secagem (Tabela 6). O inversor de frequência permitiu muita praticidade no ajuste da velocidade do ar de secagem. Porém, quando foi necessário utilizar baixos valores de velocidade do ar, como por exemplo, a velocidade de 0,4 m s⁻¹, a ventilação do motor do ventilador, devido ao sistema de auto ventilação, ficava deficitária, em função da baixa rotação, o que poderia comprometer o funcionamento e a vida útil do motor.

Para resolver esse inconveniente foi instalado um diafragma na entrada de ar do ventilador (Figura 31). Quando necessário realizar a secagem com baixa velocidade do ar, diminui-se a área de entrada de ar no ventilador com o auxílio do diafragma, fazendo com que seja necessário aumentar a rotação do motor do ventilador, por meio do inversor de frequência, para conseguir proporcionar baixas velocidades do ar de secagem, sem comprometer o sistema de auto ventilação do motor.



FIGURA 31. Diafragma para regular a entrada de ar no ventilador.

Ainda na Tabela 6, observa-se boa uniformidade e consistência da temperatura entre as bandejas do secador experimental, em que não houve variações superiores a 1 °C, entre bandejas. Porém notou-se o aquecimento do ar, de aproximadamente 2 °C, com o aumento da velocidade do ar de secagem. Devido a essas observações, recomenda-se realizar a verificação da temperatura do ar de secagem com termômetro padrão para verificar se confere com a temperatura programada no controlador de temperatura, e também, que durante a secagem em camada delgada seja realizado o rodízio da posição das bandejas.

Quando testado o sistema de aquecimento do secador experimental verificou-se que o mesmo funcionou de maneira satisfatória, pois foi capaz de atingir a temperatura de 90 °C na velocidade do ar de secagem de 2 m s⁻¹ (Tabela 6), sendo capaz de atingir temperaturas mais elevadas, pois acompanhando o valor de corrente no display do controlador de potência, entregue ao conjunto de resistências elétricas, verificou-se que para a devida condição não foi necessário disponibilizar a potência máxima.

A disponibilidade de potência referida anteriormente pode ser explicada devido ao fato da potência instalada ser maior do que a dimensionada. A potência entregue ao conjunto de resistências elétricas, para fornecer uma mesma temperatura, pode variar de acordo com as condições climáticas do ambiente e variação de vazão, conforme elucidado na Equação 1.

Na Tabela 7 são apresentadas a temperatura (em °C) da superfície do secador com isolante térmico (SCI) e numa superfície sem isolante térmico (SSI),

além da temperatura do ar do ambiente, em °C, durante os testes, quando o mesmo foi regulado para as temperaturas de 40, 65 e 90 °C e velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹.

TABELA 8. Temperatura, em °C, no corpo do secador em uma superfície com isolante térmico (SCI) e numa superfície sem isolante térmico (SSI), e temperatura do ambiente (T_{amb}).

Tempo	0,4 m s ⁻¹			1,2 m s ⁻¹			2,0 m s ⁻¹		
	SCI	SSI	T_{amb}	SCI	SSI	T_{amb}	SCI	SSI	T_{amb}
40 °C									
0	25,0	30,0	23,6	25,0	30,0	24,8	25,0	31,0	24,9
20	25,0	30,0	23,6	25,0	31,0	24,8	26,0	32,0	25,2
40	25,0	30,0	23,5	25,0	31,0	24,9	26,0	32,0	25,2
60	25,0	30,0	23,6	25,0	31,0	24,9	26,0	32,0	25,3
80	25,0	30,0	23,6	26,0	31,0	25,0	26,0	32,0	25,4
100	26,0	30,0	23,5	26,0	31,0	25,1	26,0	32,0	25,6
120	27,0	30,0	23,5	26,0	31,0	25,2	26,0	32,0	25,5
65 °C									
0	29,0	42,0	24,8	30,0	44,0	27,3	29,0	45,0	26,4
20	29,0	43,0	24,8	29,0	44,0	27,5	29,0	45,0	26,5
40	29,0	43,0	24,9	30,0	44,0	27,6	28,0	45,0	26,7
60	29,0	43,0	25,0	30,0	44,0	27,5	29,0	45,0	26,8
80	28,0	43,0	25,1	30,0	45,0	27,6	30,0	45,0	27,0
100	28,0	43,0	25,2	30,0	45,0	27,7	29,0	45,0	27,0
120	29,0	43,0	25,3	30,0	44,0	27,7	30,0	45,0	27,2
90 °C									
0	31,0	54,0	25,7	31,0	56,0	27,8	29,0	56,0	25,6
20	31,0	54,0	25,7	31,0	55,0	27,6	30,0	56,0	25,6
40	31,0	53,0	25,6	31,0	55,0	27,5	30,0	56,0	25,6
60	30,0	54,0	25,5	31,0	55,0	27,4	30,0	56,0	25,7
80	31,0	53,0	25,4	31,0	54,0	27,4	30,0	55,0	25,7
100	30,0	53,0	25,4	31,0	54,0	27,3	30,0	56,0	25,7
120	30,0	53,0	25,4	31,0	54,0	27,2	30,0	56,0	25,7

Observando a Tabela 8, nota-se que a estrutura do secador com isolamento térmico não atingiu temperaturas elevadas, sendo o maior valor de temperatura registrado 31 °C, quando o secador operou na temperatura de 90 °C. Já a superfície sem isolamento térmico elevou sua temperatura conforme aumentou a temperatura de operação do secador, porém não atingiu temperatura superior a 56 °C, independente da condição do ar de secagem. Com isso pode se afirmar que o isolamento térmico do secador experimental atua de modo satisfatório.

Após os testes preliminares com o secador, foram realizadas secagens em camada delgada de folhas de guavira e de sementes de soja (Figura 32) para verificar a operacionalidade e funcionamento do mesmo.



FIGURA 32. Secagem em camada delgada de folhas de guavira (A) e de sementes de soja (B).

Durante a secagem em camada delgada, tanto das folhas de guavira como das sementes de soja, pode-se enfatizar que o secador experimental apresentou praticidade em seu uso e bom desempenho.

Na Figura 33 é apresentada a variação do teor de água em cada bandeja do secador experimental, para a secagem das folhas de guavira e sementes de soja, durante a secagem com velocidade do ar de $0,4 \text{ m s}^{-1}$ e temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

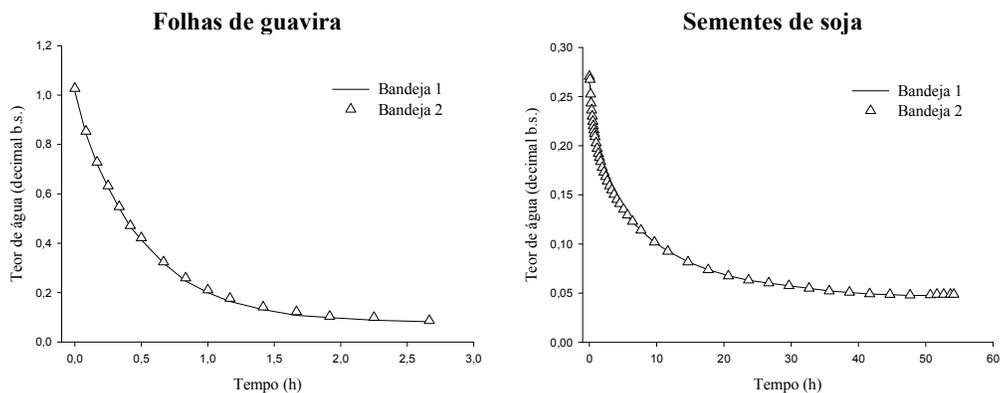


FIGURA 33. Variação do teor de água, de folhas de guavira e sementes de soja, nas bandejas 1 e 2 do secador experimental, durante a secagem com velocidade do ar de $0,4 \text{ m s}^{-1}$ e temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Em ambas as secagens em camada delgada, apresentadas na Figura 33, foi possível observar, de maneira indireta, que houve uma boa uniformidade na velocidade e temperatura do ar de secagem nas bandejas do secador experimental, pois a variação do teor de água entre as bandejas foi muito semelhante.

Também foi realizada a secagem em camada espessa de sementes de soja, Figura 34, para verificar a operacionalidade e funcionamento do secador para este tipo de secagem.



FIGURA 34. Secagem em camada espessa de sementes de soja.

Na Figura 35 é apresentada a variação do teor de água entre as embalagens teladas distribuídas na camada espessa de sementes de soja (Figura 35), durante a secagem na temperatura de 40 °C e fluxo de ar de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

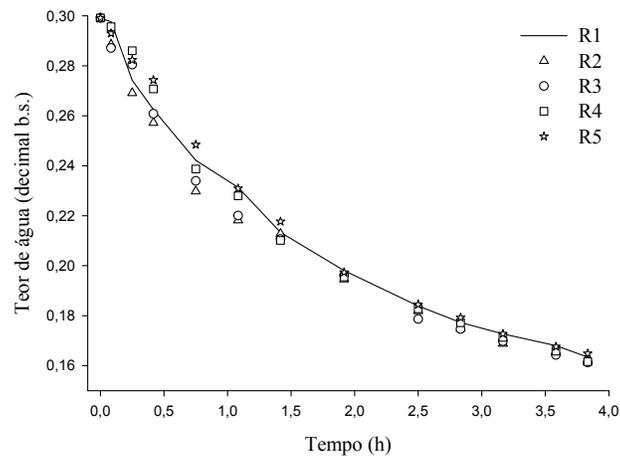


FIGURA 35. Variação do teor de água das sementes de soja secas em camada espessa, na temperatura de 40 °C e fluxo de ar de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ no secador experimental.

A secagem de sementes de soja em camada espessa, Figura 35, evidenciou o funcionamento satisfatório do secador experimental para este tipo de secagem, como pode ser observado não houve variações acentuadas do teor de água entre as embalagens espalhadas na camada de sementes durante a secagem.

De modo geral, o sistema de controle de temperatura, com lógica PID, mostrou-se eficiente em todas as temperaturas estudadas, mantendo a temperatura constante durante todo o processo de secagem, com baixas oscilações.

Em geral, quando comparado a uniformidade da temperatura do ar de secagem condicionado por estufas de circulação forçada de ar com relação ao secador experimental, o secador é bem mais eficiente, pois quando realizado estudos de cinética de secagem em estufa, a temperatura da mesma sofre oscilações da ordem de pelo menos 2 °C, dependendo da temperatura em que se está trabalhando. Essa oscilação da temperatura do ar de secagem em estufas é causada pela abertura e fechamento da porta, para a retirada das bandejas para a determinação da variação de massa durante a secagem. Sendo que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, em estufas, maior é a perturbação causada pela abertura da porta.

No secador experimental, independente do valor de temperatura ajustado, a oscilação de temperatura, observada no controlador de temperatura, não ultrapassou $\pm 0,5$ °C durante o processo de retirar as bandejas para a determinação da perda de massa durante a secagem. Quando as bandejas eram retiradas para determinar a variação de massa, a vazão de ar do secador sofria um pequeno aumento, pela falta de obstáculos (bandeja e camada de produto) no seu deslocamento, impondo menos resistência a sua passagem. A variação de vazão de ar cria um distúrbio para o controle de temperatura, mas não gera um efeito brusco no controle da temperatura.

Apesar de não terem sido realizados testes de aeração, notou-se que o secador experimental pode proporcionar meios de realizar esse tipo de ensaio, pois o ventilador é capaz de fornecer vazões de ar adequadas para aerar produtos agrícolas.

Devido ao modo como o secador experimental foi construído é possível a retirada do módulo de aquecimento (resistências elétricas) para a inserção de um módulo de resfriamento de ar (evaporador), ou até mesmo fazer com que o próprio ventilador do secador aspire ar frio de um módulo de resfriamento para permitir ensaios de resfriamento de grãos como ferramenta de aeração.

1.4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

- 1 - a geometria do secador experimental permitiu a distribuição uniforme do ar de secagem nas bandejas para secagem em camada delgada;
- 2 - o sistema de controle de temperatura, com lógica PID, apresentou funcionamento satisfatório;
- 3 - o painel de controle do secador experimental mostrou-se de fácil operação e eficiente na proteção dos equipamentos elétricos utilizados;
- 4 - o secador experimental mostrou-se satisfatório para a secagem de produtos agrícolas em camada espessa e delgada; e
- 5 - existe a possibilidade de realizar ensaios de aeração de grãos no secador.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASABE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets: ASAE D272.3 MAR1996, R2007. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ed.). Standards, Engineering Practices, and Data. St. Joseph: ASABE, 2007. p.544-550.

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

CORADI, P.C.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P. Evaluation of Electrical Conductivity as a Quality Parameter of Lemongrass Leaves (*Cymbopogon citratus* Stapf) Submitted to Drying Process. **Drying Technology**, v.32, n.8, p.969-980, 2014.

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.

DALPASQUALE, V.A., PEREIRA, J.A.M., SINICIO, R., OLIVEIRA FILHO, D. **Secado de grãos a altas temperaturas**. Santiago, Chile: Oficina Regional de la FAO para America Latina y el Caribe. 1991. 75p.

DICKSON REFRAATÓRIOS E ISOLAMENTOS LTDA, **Manta de fibra cerâmica**. Disponível em <<http://refratariosribeirao.com.br/durablanket1260.htm>>. Acesso em: 05 out. 2013.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, 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.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. Secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.603-608, 2004.

GONELI, A.L.D.; VIEIRA, M.C.; VILHASANTI, H.C.B.; GONÇALVES, A.A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária e Tropical**, v.44, n.1, p.56-64, 2014.

IBRAM, **Catálogo Ventilador Siroco VSI**. Disponível em: <http://www.ibram.ind.br/downloads/ventilador_siroco_vsi_p.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2013.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p.98-108, 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]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Universitária, 2002, 206 p.

MONTE, J.E.C.; MARTINS, J.H.; LOPES, D.C.; MONTEIRO, P.M.B.; PINTO, P.R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Scientiarum Agronomy**. v.30, n.3, p.307-312, 2008.

MONTEIRO, P.M.B. **Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo Real de Sistemas de Aeração de Grãos**. 2002. 135p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.3, p.455-463, 2013.

NOVUS, **Controlador de potência**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/controlador%20de%20pot%Eancia.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013a.

NOVUS, **Controladores e indicadores**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/folheto%20n1200.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013b.

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, n.2, p.190-201, 2012.

OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.A.; MARTINAZZO, A.P. Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.15, n.1, p.1-12, 2013.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C., OLIVEIRA, R.A., PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf>. Acesso em: 28 maio 2013.

PRATES, M.O.; PIZZILOLO, T.A.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P.; NICÁCIO, J.V. Controle da temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais. **Engenharia na agricultura**, v.19, n.2, p.101-111, 2011.

PRATES, M.F.O.; REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; FARIA, R.Q.; LIMA JUNIOR, A.F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.14, n.3, p.514-521, 2012.

QUEIROZ, D.M.; CORRÊA, P.C.; SOUZA, C.M.A. SIMSEC – Um programa para simulação de secagem. In: **CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-**

COLHEITA, 1., Porto Alegre, 1999. Anais. Passo Fundo: Abrapós; Cesa; Embrapa Trigo, 1999. 248p.

REIS, R.C.; BARBOSA, L.S.; LIMA, M.L.; REIS, J.S.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.4, p.347-353, 2011.

RODRIGUES, C.L.C. **Desenvolvimento de um sistema automático para um secador de produtos agrícolas**. 2010. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SANTOS, D.C; QUEIROZ, A. J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Cinética de secagem de farinha de grãos residuais de urucum. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.223-231, 2013.

SCHNEIDER, H.; SILVA, C.A. Características da dinâmica climática de Dourados/MS. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, n.4, p.782-791, 2012.

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; DONZELLES, S.M.L.; NOGUEIRA, R.M. Secagem e Secadores. In: SILVA, J.S. (Ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008a. 109-146p.

SILVA, J.S.; MELO, E.C.; PINTO, F.A.C. Seleção e construção de ventiladores. In: SILVA, J.S. (Ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008b. 249-268p.

SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES T.H. Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.278-285, 2013.

STOECKER, W.F.; JONES, J.W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. 481p.

WEG, **Inversor de frequência CFW 08**. Disponível em <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW08>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

CAPÍTULO 2

CINÉTICA DE SECAGEM DE GRÃOS DE CÁRTAMO

2.1 INTRODUÇÃO

Com o grande avanço tecnológico que vem acontecendo, cada vez mais necessita-se de fontes de energia para impulsionar esses avanços, sendo que parte dessa energia é proveniente de combustíveis derivados do petróleo, o qual é uma fonte energética fóssil e findável. Com isso a procura por fontes energéticas renováveis e menos poluentes vem sendo cada vez mais interessante e necessário.

Diante desse contexto, surgem várias culturas com potencial para a produção de biocombustíveis, como alternativa ao combustível derivado do petróleo. Dentre as culturas oleaginosas, o cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), é uma cultura que apresenta grande potencial como matéria prima para a produção de biodiesel. É uma cultura oleaginosa em que o teor de óleo pode variar de 20 a 45%, sendo de ótima qualidade, podendo ser usado para fins medicinais, industriais, alimentação humana e animal (DAJUE & MÜNDEL, 1996; EKIN, 2005; COŞGE et al., 2007; EMONGOR, 2010; PADILHA et al., 2012).

O cártamo, assim como a maioria dos produtos agrícolas, quando colhido apresenta teor de água inadequado para o armazenamento seguro. Com isso é necessário remover o excesso de água do produto, evitando proporcionar condições adequadas para o desenvolvimento de microrganismos, reações físicas e químicas que venham a deteriorar o produto durante o período em que o mesmo ficar armazenado.

A secagem é uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas que tem por finalidade retirar o excesso de água contido no grão por meio de evaporação. A remoção de água dos produtos agrícolas consiste em um complexo processo, envolvendo a transferência simultânea de calor e massa entre o ar de secagem e o produto a ser seco, no qual o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor na superfície do produto, provocando a redução no teor de água do mesmo. O principal objetivo da secagem é a redução do conteúdo

de água até níveis seguros que permitam o correto armazenamento do produto por determinados períodos de tempo.

Em escala comercial e industrial, a secagem de produtos agrícolas é realizada em secadores, os quais removem o excesso de água do produto. Para estudar a cinética de secagem de produtos agrícolas, em nível de laboratório, os pesquisadores realizam a secagem do mesmo em camada delgada, sendo a mesma formada pela espessura de uma única unidade de produto. Ao realizar o estudo da secagem de produtos agrícolas em camada delgada, é possível descrever a curva de secagem do produto, e ajustar modelos matemáticos que representem o devido processo de modo satisfatório.

As curvas de secagem fornecem informações que são de fundamental importância para o desenvolvimento de processos, otimização e dimensionamento de equipamentos destinados à secagem de produtos agrícolas. Com elas pode-se estimar o tempo de secagem de determinada quantidade de produto, e com isso realizar o planejamento de produção e o gasto energético envolvido no processo, o qual refletirá no valor final do produto (VILELA & ARTUR, 2008).

As informações que são obtidas durante a secagem em camada delgada (equações ajustadas para representar a curva de secagem) combinada com as equações representativas de outras propriedades físicas específicas do produto em questão, formam um conjunto de relações matemáticas que auxiliam nos cálculos e no entendimento do processo de secagem em camada espessa (MARTINAZZO et al., 2010), em que, uma camada espessa é constituída por sucessivas camadas delgadas (KASHANINEJAD et al., 2007).

São apresentados na literatura especializada diversos modelos matemáticos para representar as curvas de secagem de produtos agrícolas em camada delgada. Os modelos matemáticos, tradicionalmente utilizados, são capazes de estimar as curvas de secagem, as quais são em função da variação da razão de umidade e do tempo gasto no processo de remoção de água.

Há três tipos de modelos usados para representar as curvas de secagem de produtos agrícolas em camada delgada, sendo eles os modelos teóricos, semi-teóricos e os empíricos. Os modelos teóricos, que consideram apenas a resistência interna a transferência de calor e água entre o produto e o ar de secagem, os modelos semi-teóricos e os empíricos, que consideraram somente a resistência externa, a temperatura e umidade relativa do ar de secagem (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Os modelos semi-teóricos vem sendo utilizados por muitos pesquisadores para estimar as curvas de secagem de diversos produtos agrícolas, esses modelos, normalmente, oferecem facilidade em sua aplicação, porém sua validade se limita apenas à faixa de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar em que os

mesmos foram ajustados. Esses modelos, geralmente são derivados da simplificação da segunda lei de Fick ou modificações de modelos simplificados, e ainda, consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (OZDEMIR & DEVRES, 1999; PANCHARIYA et al., 2002).

Já os modelos empíricos, apesar de negligenciarem os principais fundamentos do processo de secagem e os seus parâmetros não apresentarem nenhum significado físico, os mesmos são capazes de representar, em determinadas condições experimentais, as curvas de secagem de produtos agrícolas (KEEY, 1972), pois os mesmos apresentam uma relação direta entre o teor de água do produto e o tempo de secagem.

O modelo da difusão é o mais estudado entre os modelos teóricos aplicados ao processo de secagem de produtos agrícolas. Estes modelos, que descrevem a secagem à taxa decrescente de um sólido, consideram como o principal mecanismo, a difusão baseada na segunda lei de Fick, a qual fundamenta-se que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (PARK et al., 2002). A estrutura dos produtos agrícolas geralmente apresentam micro poros ou capilares, o que permite que a movimentação de água durante o processo de secagem envolva diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão de superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (GONELI et al., 2009). Ainda, segundo Goneli et al. (2009), a teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade no processo, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, podendo induzir a erros experimentais, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente.

O coeficiente de difusão ou difusividade efetiva engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a movimentação de água em um sólido, sendo seu valor obtido por meio de ajuste de modelos aos valores experimentais. A difusividade expressa a facilidade de remoção de água de um produto. Ao alterar as condições de secagem, como temperatura e velocidade do ar, varia-se a difusividade, tornando assim explícito que a mesma não é intrínseca ao material, com isso convencionou-se chama-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA et al., 2006).

A principal propriedade do ar que influencia na secagem de produtos agrícolas é a temperatura, seguida da velocidade do ar de secagem. Nos processos de secagem quando se aumenta a taxa de insuflação de ar no produto, pode ocorrer aumento da taxa de redução de água, conseqüentemente redução do tempo necessário para a secagem do produto, e ainda, pode causar alterações qualitativas no produto. O efeito da velocidade do ar na secagem de produtos agrícolas é influenciado pelo teor de água inicial e tipo de produto, método de secagem, e até mesmo pela

temperatura do ar. Assim a velocidade do ar pode ter uma contribuição maior ou menor no tempo necessário para a secagem de produtos agrícolas, de acordo com a combinação dos fatores citados anteriormente.

A interação entre as variáveis temperatura e velocidade do ar durante o processo de secagem em camada delgada, vem sendo estudado para diversos produtos agrícolas para verificar o efeito destas no comportamento da cinética de secagem e difusão efetiva, como em grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014), bagaço de cenoura (KUMAR et al., 2011), nozes de pistachio (KASHANINEJAD et al., 2007), folhas de hortelã verde e urtiga (KAYA e AYDIN, 2009), frutos de azeitona russa (MAYVAN et al., 2012).

Outro conhecimento muito importante, além dos fornecidos pelo modelo da difusão, são as propriedades termodinâmicas, que nos processos de secagem dos produtos agrícolas nos permite calcular a energia requerida no processo, estudar as propriedades da água adsorvida, avaliar a microestrutura dos alimentos, bem como estudar os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos, tornando-se assim uma importante fonte de informações para projetar equipamentos destinados a secagem de produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2010).

Dentre os parâmetros termodinâmicos analisados em processos de secagem de produtos agrícolas, destacam-se três, sendo eles a entalpia específica (h), entropia específica (s) e a energia livre de Gibbs (G), os quais são estudados para diversos produtos agrícolas (JIDEANI & MPOTOKWANA, 2009; CORRÊA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014).

As mudanças dos valores de entalpia fornecem uma medida da variação de energia que ocorre quando há interação das moléculas de água com os constituintes do produto durante um processo de sorção. A entropia é uma grandeza termodinâmica que caracteriza ou define o grau de desordem existente em um sistema água-produto, pois a mesma pode estar associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema, e relacionada com o arranjo espacial da interface água-produto (MCMINN et al., 2005).

Já a energia livre de Gibbs está relacionada com a afinidade entre a água e o produto, indicando se o processo de remoção de água é espontâneo ou não. Valores negativos dessa grandeza indicam que o processo ocorre de maneira espontânea, enquanto valores positivos indicam a não espontaneidade do processo (TELIS et al., 2000). As mudanças nos valores de energia livre de Gibbs, durante o processo de secagem, é definida como a energia necessária para transferir moléculas de água, na forma de vapor, para uma superfície sólida ou vice e versa. Essa energia requerida é considerada como uma medida do trabalho feito para realizar o processo de desorção ou de adsorção. A energia livre de Gibbs atinge o equilíbrio quando seus valores forem iguais a zero (NAYAK & PANDEY, 2000).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito causado pela temperatura e velocidade do ar na cinética de secagem em camada delgada de grãos de cártamo, ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais para prever as curvas de secagem, além de determinar os coeficientes de difusão efetivo e as propriedades termodinâmicas do produto durante o processo de secagem.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, da Faculdade de Ciências Agrárias - FCA, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, no Município de Dourados, MS.

Foram utilizados grãos de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) cultivados na Fazenda Experimental da UFGD. Durante o desenvolvimento da cultura do cártamo foram realizados todos os tratamentos culturais necessários para o bom desenvolvimento da cultura até a sua colheita.

Os capítulos de cártamo foram colhidos manualmente, selecionando apenas os que já haviam atingido a maturação. A debulha foi manual seguida de uma nova seleção, retirando-se todos aqueles defeituosos, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa.

Após a debulha os grãos de cártamo foram acondicionados em embalagem plástica e armazenados em câmara do tipo B.O.D. à temperatura de 3,5 °C, para evitar troca de água na forma de vapor entre o produto e o ambiente externo, visando assim, manter e homogeneizar o teor de água do produto.

Os testes de secagem foram realizados em um secador experimental (Figura 1). O secador possui como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, totalizando 12 kW de potência, um ventilador Siroco, do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui um motor de 1 cv. O controle de temperatura é realizado por meio de um controlador universal de processos, modelo N1200, da marca Novus, trabalhando com controle proporcional integral derivativo (PID), e o fluxo de ar é selecionado por meio de um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador. O leito de secagem em camada delgada foi composto por duas bandejas de 20 cm de diâmetro de cada, com fundo telado, nas quais foram dispostos aproximadamente 70 g de grãos de cártamo, formando uma camada delgada (Figura 2).

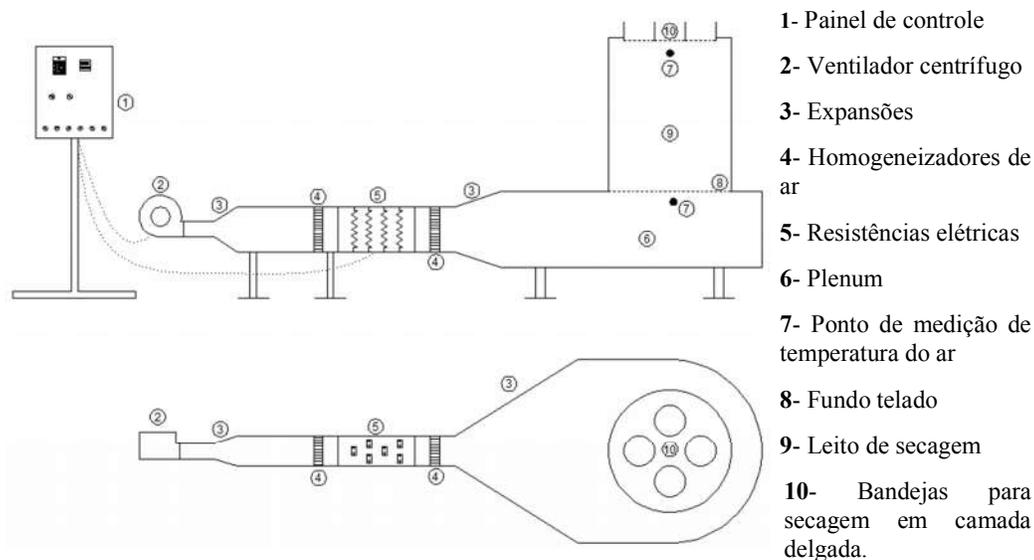


FIGURA 1. Secador experimental utilizado na secagem dos grãos de cartamo.



FIGURA 2. Camada delgada de grãos de cartamo disposta nas bandejas do secador.

Após a debulha os grãos de cartamo apresentaram teor de água de aproximadamente 0,48 decimal b.s. (base seca). 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 do produto foi submetida a uma combinação de três diferentes velocidades e cinco temperaturas controladas do ar de secagem, com suas respectivas umidades relativas, conforme Tabela 1. A umidade relativa do ar de secagem foi calculada utilizando-se o software Grapsi, versão 8.1.1, com base em dados das condições do ambiente, o qual foi monitorado periodicamente durante o processo de secagem, utilizando-se três termo-higrômetros.

TABELA 1. Temperatura, velocidade e umidade relativa do ar empregado nas secagens dos grãos de cártamo.

Velocidade (m s ⁻¹)	Temperatura (°C)				
	40	50	60	70	80
	Umidade relativa (%)				
0,4	15,22	12,52	8,95	6,43	2,85
1,0	18,26	7,09	3,87	3,69	1,41
1,6	17,63	11,25	8,12	4,86	4,37

A velocidade do ar de secagem foi ajustada com o auxílio de um termoanemômetro de pás rotativas, da marca Instrutherm, modelo TAD 500, ajustando a rotação do motor do ventilador, por meio do inversor de frequência, até atingir a velocidade do ar desejada, com precisão de $\pm 0,1$ m s⁻¹.

A redução do teor de água dos grãos de cártamo durante a secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico, utilizando uma balança com resolução de 0,01 g. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, em que os intervalos de pesagem foram determinados pela diferença de massa entre as sucessivas leituras, evitando diferenças elevadas de teor de água entre uma leitura e outra (conhecendo-se a massa e o teor de água inicial). A secagem foi conduzida até o produto atingir o teor de água de equilíbrio, mas para fins de modelagem matemática, o teor de água final dos grãos de cártamo, foi considerado de aproximadamente $0,07 \pm 0,01$ decimal b.s..

A razão de umidade dos grãos de cártamo, para as diferentes condições do ar de secagem, foi determinada por meio da Equação 1.

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

em que:

RU: razão de umidade do produto, adimensional;

U: teor de água do produto em um determinado tempo, 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..

Aos dados de razão de umidade, obtidos experimentalmente durante a secagem dos grãos de cártamo, foram ajustados modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a secagem de produtos agrícolas,

utilizados por diversos pesquisadores (GONELI et al., 2009; MARTINAZZO et al., 2010; RESENDE et al., 2011; SOUSA et al., 2011; FARIA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2013; RESENDE et al., 2014). Os modelos matemáticos utilizados neste trabalho estão dispostos na Tabela 2.

TABELA 2. Modelos matemáticos ajustados às curvas de secagem dos grãos de cártamo.

Designação do modelo	Modelo	
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k b \theta)$	(2)
Dois termos	$RU = a \exp(-k_0 \theta) + b \exp(-k_1 \theta)$	(3)
Exponencial de Dois Termos	$RU = a \exp(-k \theta) + (1 - a) \exp(-k a \theta)$	(4)
Henderson e Pabis modificado	$RU = a \exp(-k \theta) + b \exp(-k_0 \theta) + c \exp(-k_1 \theta)$	(5)
Logarítmico	$RU = a \exp(-k \theta) + c$	(6)
Midilli	$RU = a \exp(-k \theta^n) + b \theta$	(7)
Page	$RU = \exp(-k \theta^n)$	(8)
Thompson	$RU = \exp\{[-a - (a^2 + 4 b \theta)^{0.5}]/2b\}$	(9)

em que:

θ : tempo de secagem, h;

k, k_0, k_1 : constantes de secagem, h^{-1} ; e

a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

A taxa de redução de água durante a secagem dos grãos de cártamo foi determinada pela Equação 10, conforme Corrêa et al. (2001), que conceituam a mesma como a quantidade de água que um determinado produto perde por unidade de matéria seca por unidade de tempo.

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{MS(t_i - t_0)} \quad (10)$$

em que:

TRA: taxa de redução de água, $kg \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

Ma_0 : massa de água total anterior, kg;

Ma_i : massa de água total atual, kg;

MS: massa de matéria seca, kg;

t_0 : tempo total de secagem anterior, h; e

t_i : tempo total de secagem atual, h.

2.2.1 Determinação do coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, Equação 11, aos dados experimentais da secagem dos grãos de cártamo para as diferentes condições do ar (Tabela 1). 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.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n_t=1}^{\infty} \frac{1}{n_t^2} \exp \left[-\frac{n_t^2 \pi^2 D_i \theta}{9} \left(\frac{3}{R_e} \right)^2 \right] \quad (11)$$

em que:

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

R_e : raio equivalente, m; e

n_t : número de termos;

O raio equivalente utilizado no modelo da difusão efetivo é definido como o raio de uma esfera cujo volume é igual ao do grão.

Para a determinação do raio equivalente fez-se a medição dos três eixos ortogonais dos grãos de cártamo, os quais são: comprimento (a), largura (b) e espessura (c). Com auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, 100 grãos foram escolhidos aleatoriamente e medidos. O volume de cada grão, considerado como um corpo cono-esférico, foi calculado com base nos diâmetros perpendiculares, utilizando a Equação 12, descrita por Jain & Bal (1997).

$$V_g = \frac{\pi D^2 a^2}{6 (2a - D)} \quad (12)$$

onde:

$$D = (b c)^{0,5} \quad (13)$$

em que:

V_g : volume do grão, mm^3 ;

a: comprimento, mm;

b: largura, mm;

c: espessura, mm; e

D: média geométrica entre as medidas “b” e “c” do produto.

2.2.2 Influência da temperatura

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo, foi utilizada a equação de Arrhenius, descrita na Equação 14.

$$D_i = D_o \exp\left(\frac{E_a}{R T_a}\right) \quad (14)$$

em que:

D_o : fator pré-exponencial;

R: constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

T_a : temperatura, K; e

E_a : energia de ativação, kJ mol^{-1} .

As propriedades termodinâmicas entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, relacionadas ao processo de secagem dos grãos de cártamo, foram determinadas através do método descrito por Jideani & Mpotokwana (2009), de acordo com as Equações 15, 16 e 17.

$$h = E_a - RT_a \quad (15)$$

$$s = R \left(\ln D_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T_a \right) \quad (16)$$

$$G = h - T_a s \quad (17)$$

em que:

h: entalpia específica, J mol⁻¹;

s: entropia específica, J mol⁻¹ K⁻¹;

G: energia livre de Gibbs, J mol⁻¹;

k_B: constante de Boltzmann, 1,38 x 10⁻²³ J K⁻¹; e

h_P: constante de Planck, 6,626 x 10⁻³⁴ J s⁻¹.

2.2.3 Análise estatística

Os dados experimentais de razão de umidade durante a secagem dos grãos de cártamo foram submetidos à análise de regressão não linear, pelo método de Gauss-Newton, e seleção do modelo matemático adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa computacional Statistica 8.0.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, para todas as condições do ar de secagem, foram consideradas as maiores magnitudes do coeficiente de determinação (R²), valores reduzidos do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE).

Os valores do erro médio relativo (P, em %) e do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal) foram calculados conforme descrito pelas Equações 18 e 19:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (18)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;

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

GLR: graus de liberdade do modelo.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentadas as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal), erro médio relativo (P, em %) e o coeficiente de determinação (R^2 , em decimal) para os oito modelos ajustados aos dados experimentais de razão de umidade obtidos durante a secagem dos grãos de cártamo para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.

Em todas as temperaturas e velocidades do ar utilizadas nas secagens dos grãos de cártamo, os modelos ajustados apresentaram valores de coeficiente de determinação (R^2) superiores à 0,98 (Tabela 3), o que segundo Kashaninejad et al. (2007) indica uma representação satisfatória destes modelos para o processo de secagem estudado. Madamba et al. (1996) e Mohapatra & Rao (2005) afirmam que o uso do valor do coeficiente de determinação como único critério, não é um bom parâmetro para seleção de modelos matemáticos não lineares para representar o processo de secagem, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos.

Conforme Draper & Smith (1998) o desvio padrão da estimativa indica a capacidade de um modelo descrever com fidelidade um determinado processo físico, sendo que quanto menor seu valor melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados. Nota-se que os modelos de Thompson (9), Logarítmico (6) e Exponencial de Dois Termos (4) em quase todas as temperaturas e velocidades do ar de secagem apresentaram valores do desvio padrão da estimativa (SE) mais elevado que os demais (Tabela 3).

Com exceção do modelo de Thompson (9) todos os demais modelos ajustados apresentaram valores do erro médio relativo (P) inferior a 10% em todas as temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas (Tabela 3). Os valores do erro médio relativo indicam o desvio dos dados observados com relação a curva estimada pelo modelo (KASHANINEJAD et al., 2007). Mohapatra & Rao (2005) afirmam que os modelos que apresentam valores de erro médio relativo superior a 10% são inadequados para representar o processo de secagem. Com base no erro médio relativo (P) apenas o modelo de Thompson (9) não é adequado para representar o processo de secagem de grãos de cártamo.

TABELA 3. Parâmetros estatísticos obtidos na secagem dos grãos de cártamo.

Modelos	0,4 m s ⁻¹			1,0 m s ⁻¹			1,6 m s ⁻¹		
	SE	P	R ²	SE	P	R ²	SE	P	R ²
40°C									
(02)	0,0056	1,8424	0,9996	0,0085	3,4766	0,9991	0,0049	1,9994	0,9996
(03)	0,0058	1,8427	0,9996	0,0087	3,4770	0,9991	0,0050	1,9996	0,9996
(04)	0,0222	2,5151	0,9933	0,0259	3,8747	0,9910	0,0274	3,6513	0,9867
(05)	0,0032	0,9210	0,9999	0,0030	0,7153	0,9999	0,0026	1,0902	0,9999
(06)	0,0228	3,1413	0,9932	0,0252	3,4886	0,9918	0,0244	3,4988	0,9898
(07)	0,0108	3,3154	0,9986	0,0134	4,5466	0,9978	0,0132	4,6328	0,9971
(08)	0,0215	6,3231	0,9937	0,0254	8,7188	0,9913	0,0228	7,9773	0,9908
(09)	0,0311	8,4152	0,9868	0,0349	11,3778	0,9836	0,0321	10,9184	0,9818
50°C									
(02)	0,0099	3,2539	0,9987	0,0095	3,1946	0,9987	0,0077	2,7878	0,9991
(03)	0,0170	2,8988	0,9962	0,0098	3,1943	0,9987	0,0079	2,7878	0,9991
(04)	0,0235	5,4064	0,9921	0,0180	3,1319	0,9951	0,0158	2,4794	0,9962
(05)	0,0026	0,7829	0,9999	0,0024	0,7454	0,9999	0,0020	0,7267	0,9999
(06)	0,0164	2,1004	0,9963	0,0227	2,8181	0,9926	0,0216	2,8505	0,9932
(07)	0,0116	3,4406	0,9983	0,0132	3,8558	0,9977	0,0127	4,0726	0,9978
(08)	0,0187	5,1733	0,9950	0,0224	6,3502	0,9925	0,0197	5,9108	0,9940
(09)	0,0233	5,2277	0,9922	0,0291	7,2539	0,9872	0,0259	6,8222	0,9897
60°C									
(02)	0,0060	1,7107	0,9996	0,0277	7,0071	0,9905	0,0044	1,6426	0,9998
(03)	0,0063	1,7107	0,9996	0,0044	1,4971	0,9998	0,0045	1,6426	0,9998
(04)	0,0136	2,6153	0,9976	0,0067	1,6472	0,9994	0,0058	1,7577	0,9996
(05)	0,0068	1,7107	0,9996	0,0027	0,5664	0,9999	0,0020	0,4431	0,9999
(06)	0,0117	1,6224	0,9983	0,0159	2,3251	0,9969	0,0148	2,2010	0,9974
(07)	0,0084	2,3445	0,9992	0,0091	2,4726	0,9991	0,0082	2,1161	0,9993
(08)	0,0109	2,6406	0,9985	0,0099	2,1934	0,9987	0,0087	1,7766	0,9990
(09)	0,0134	2,6250	0,9976	0,0150	3,2245	0,9970	0,0134	2,6782	0,9977
70°C									
(02)	0,0039	1,1116	0,9998	0,0048	1,6740	0,9997	0,0051	1,6336	0,9997
(03)	0,0041	1,0608	0,9998	0,0051	1,6714	0,9997	0,0054	1,6317	0,9997
(04)	0,0048	0,6558	0,9997	0,0069	2,1464	0,9994	0,0114	3,5561	0,9984
(05)	0,0013	0,2489	0,9999	0,0014	0,3568	0,9999	0,0013	0,3495	0,9999
(06)	0,0055	0,7782	0,9997	0,0155	3,5640	0,9973	0,0168	3,7804	0,9969
(07)	0,0031	0,5711	0,9999	0,0027	0,6991	0,9999	0,0022	0,6278	0,9999
(08)	0,0030	0,7474	0,9999	0,0025	0,6971	0,9999	0,0023	0,8817	0,9999
(09)	0,0047	0,6051	0,9997	0,0080	1,9616	0,9992	0,0069	1,6969	0,9994
80°C									
(02)	0,0031	1,0032	0,9999	0,0049	1,5277	0,9997	0,0044	1,5097	0,9998
(03)	0,0032	0,9926	0,9999	0,0052	1,5260	0,9997	0,0047	1,5125	0,9998
(04)	0,0030	0,9924	0,9999	0,0156	4,7751	0,9968	0,0202	6,2263	0,9947
(05)	0,0012	0,3013	0,9999	0,0008	0,1509	0,9999	0,0008	0,1828	0,9999
(06)	0,0091	2,1815	0,9990	0,0191	4,4276	0,9956	0,0233	5,7792	0,9937
(07)	0,0011	0,2962	0,9999	0,0018	0,4519	0,9999	0,0017	0,5378	0,9999
(08)	0,0031	1,0316	0,9999	0,0017	0,4859	0,9999	0,0018	0,4773	0,9999
(09)	0,0037	0,8081	0,9998	0,0078	2,0519	0,9992	0,0086	2,5394	0,9991

Com base nos parâmetros estatísticos pré-estabelecidos, apenas o modelo de Thompson (9) não é adequado para representar o processo de secagem em todas as condições do ar de secagem estudado. Sendo assim os modelos Aproximação da Difusão (2), Dois Termos (3), Exponencial de Dois Termos (4), Henderson e Pabis modificado (5), Logarítmico (6), Midilli (7) e Page (8) podem ser utilizados para

descrever o processo de secagem de grãos de cártamo para todas as condições do ar de secagem estudadas neste trabalho.

Dentre os modelos recomendados para descrever a secagem em camada delgada dos grãos de cártamo, nas diferentes condições do ar de secagem estudado, foi selecionado o modelo de Page devido a sua simplicidade matemática, por possuir apenas dois parâmetros, simplificando sua aplicação em simulações matemáticas do processo de secagem, e também devido a sua tradicionalidade em descrever processos de secagem em camada delgada de oleaginosas e outros produtos, como de sementes de pinhão manso (RESENDE et al. 2011), canola (DUC et al., 2011), grãos de mamona (GONELI, 2008), grãos de amendoim (ARAUJO, 2013), frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2013), grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014), grãos de café descascados (GONELI et al., 2009), polpa de cupuaçu (PEREZ et al., 2013), nozes de pistachio (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Figura 3 são apresentados, para todas as condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, os valores observados e estimados, pelo modelo de Page, de razão de umidade para a secagem em camada delgada dos grãos de cártamo.

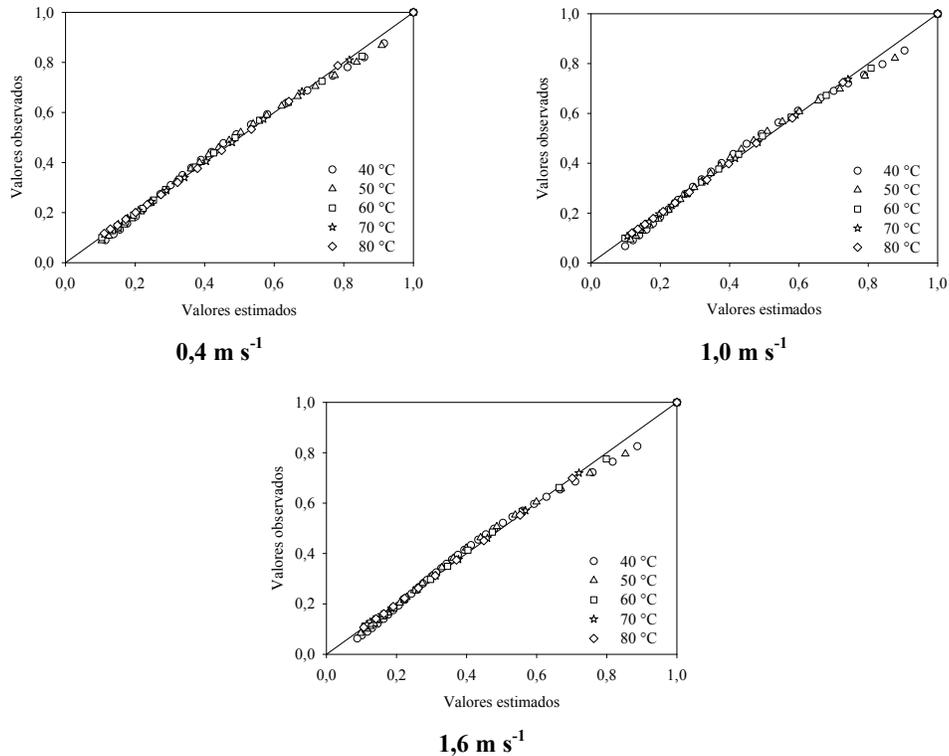


FIGURA 3. Valores de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de cártamo em camada delgada nas diferentes temperaturas e velocidades do ar.

Analisando a Figura 3 é possível observar que os dados de razão de umidade observados e estimados pelo modelo de Page, durante a secagem dos grãos de cártamo, acompanham uma reta com inclinação de 45°, reforçando assim a aplicabilidade do modelo de Page para representar o processo de secagem estudado neste trabalho.

Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados os valores observados e estimados pelo modelo de Page para a secagem em camada delgada dos grãos de cártamo nas velocidades do ar de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, e temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Fica evidenciado, pela proximidade dos valores observados aos ajustados pelo modelo de Page, o ajuste satisfatório deste modelo às condições de secagem estudadas neste trabalho.

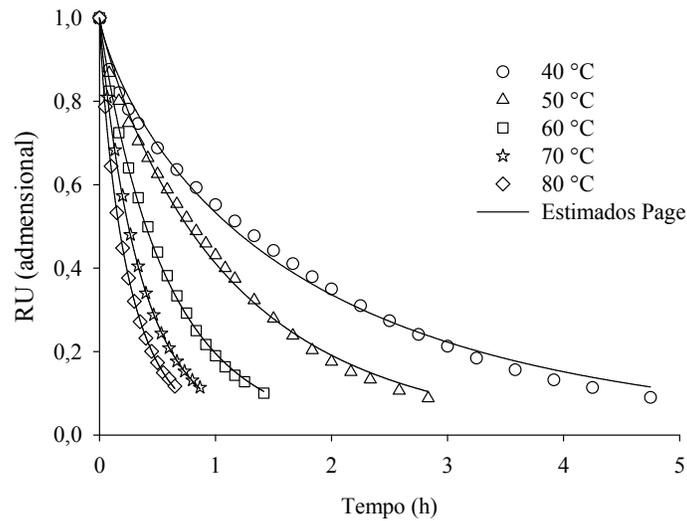


FIGURA 4. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de cártamo em camada delgada na velocidade do ar de 0,4 m s⁻¹.

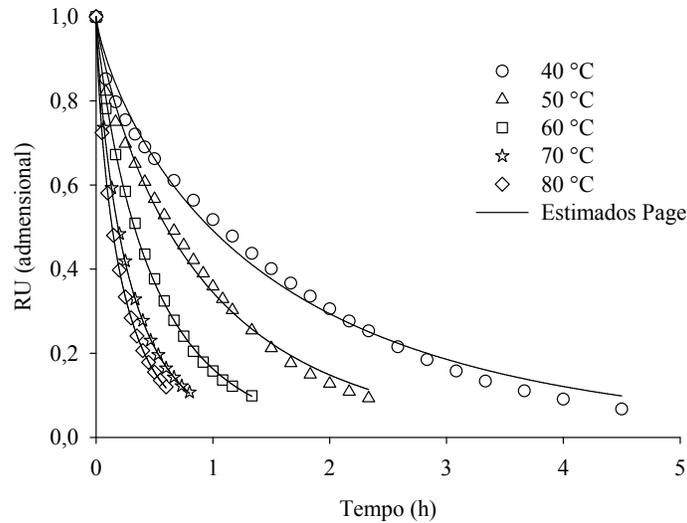


FIGURA 5. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de cártamo em camada delgada na velocidade do ar de $1,0 \text{ m s}^{-1}$.

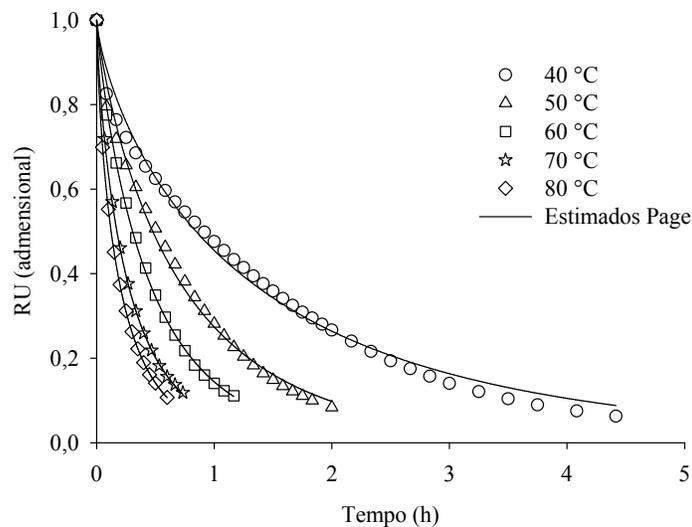


FIGURA 6. Valores de razão de umidade experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem dos grãos de cártamo em camada delgada na velocidade do ar de $1,6 \text{ m s}^{-1}$.

O processo de secagem dos grãos de cártamo ocorreu no período de secagem a taxa decrescente (Figuras 4, 5 e 6), evidenciando uma maior resistência a transferência de calor da superfície para o interior e também uma maior resistência a transferência de massa (água) do interior para a superfície do produto, fazendo com que a taxa de evaporação superficial seja superior à taxa de reposição de água na superfície do produto (KASHANINEJAD et al., 2007).

Na Tabela 4 é apresentado o tempo necessário, em horas, para que os grãos de cártamo atingissem o teor de água médio de $0,07\pm 0,01$ decimal b.s. para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas neste trabalho.

TABELA 4. Tempo (horas) necessário para os grãos de cártamo atingirem o teor de água de aproximadamente $0,07\pm 0,01$ decimal b.s..

Velocidade (m s^{-1})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				
	40	50	60	70	80
0,4	4,75	2,83	1,42	0,87	0,65
1,0	4,50	2,33	1,33	0,80	0,60
1,6	4,42	2,00	1,17	0,73	0,60

Analisando as Figuras 4, 5 e 6 e a Tabela 4 nota-se uma significativa influencia da temperatura do ar sobre as curvas de secagem dos grãos de cártamo em camada delgada, em que aumentando-se a temperatura do ar diminui-se o tempo necessário para atingir o mesmo teor de água, comportamento este típico para vários produtos agrícolas e observado por diversos pesquisadores estudando inúmeros produtos agrícolas (CORRÊA et al., 2001; COSTA et al., 2011; DUC et al., 2011; RESENDE et al., 2011; SOUSA et al., 2011; FARIA et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2012; RESENDE et al., 2014).

Nota-se que o efeito da velocidade do ar sobre as curvas de secagem dos grãos de cártamo em camada delgada (Tabela 4) foi consideravelmente menos significativo que o apresentado pela variação da temperatura do ar no tempo final de secagem, para o produto atingir o teor de água de $0,07\pm 0,01$ decimal b.s.. Muhidong et al. (2013) estudando o comportamento da secagem de café arábica (*Coffea arabica* L.) testou três níveis de velocidade do ar ($0,5$; $1,2$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$) e uma temperatura de secagem (47°C), constatando que o aumento da velocidade do ar de secagem não conseguiu melhorar consideravelmente a taxa de secagem. Esse efeito também foi observado em outros produtos agrícolas, como em fatias de cebola (SARSAVADIA et al., 1999), em goiabas (Rodrigues et al., 2002), caju (GOUVEIA et al., 2002).

Ainda analisando as Figuras 4, 5 e 6 e Tabela 4, pode ser observado, que a influência exercida pela velocidade do ar no tempo total do processo de secagem dos grãos de cártamo é mais significativa nas menores temperaturas, pois conforme aumenta a temperatura do ar de secagem menos acentuada é a diferença de tempo para realizar o processo de secagem com as diferentes velocidades do ar. Isso é explicado pelo fato da principal causa do processo de secagem ser a diferença de

pressão de vapor entre o ar de secagem e o produto, sendo essa diferença de pressão de vapor elevada com o aumento da temperatura do ar, acelerando assim o processo de secagem.

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as curvas de taxa de redução de água para as velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,0 e 1,6 m s^{-1} , respectivamente, durante a secagem em camada delgada dos grãos de cártamo para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 $^{\circ}\text{C}$.

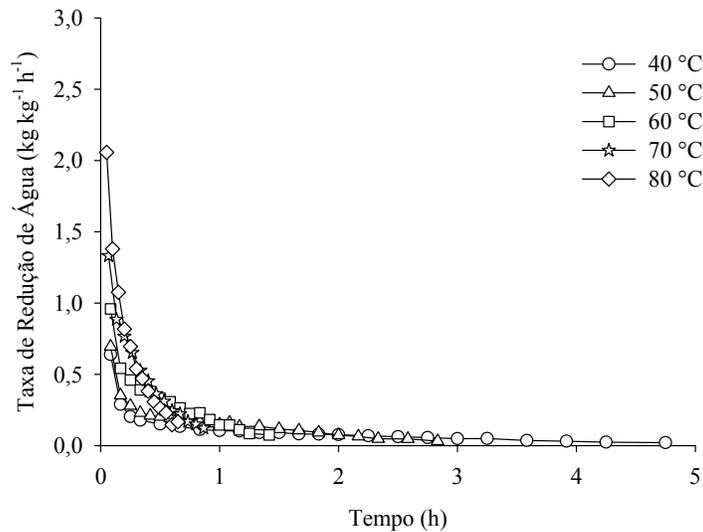


FIGURA 7. Taxa de redução de água para os grãos de cártamo durante o processo de secagem em camada delgada na velocidade de 0,4 m s^{-1} .

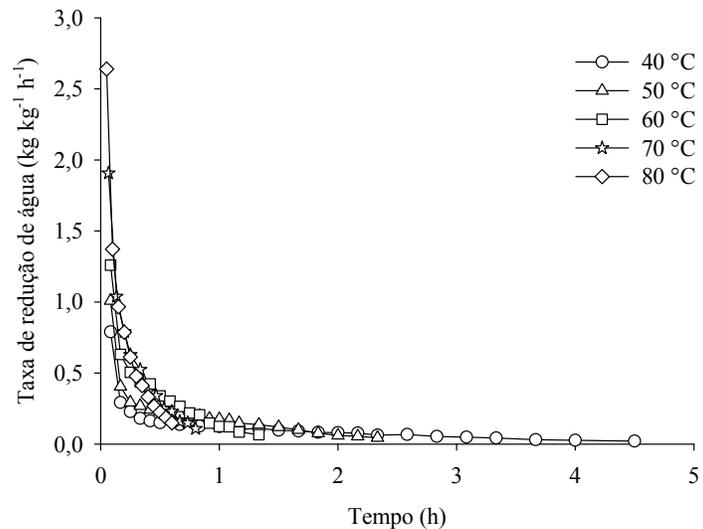


FIGURA 8. Taxa de redução de água para os grãos de cártamo durante o processo de secagem em camada delgada na velocidade de 1,0 m s^{-1} .

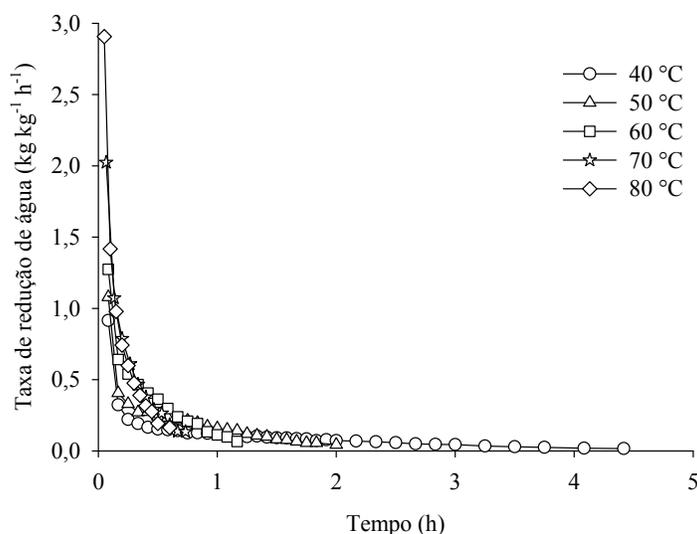


FIGURA 9. Taxa de redução de água para os grãos de cártamo durante o processo de secagem em camada delgada na velocidade de $1,6 \text{ m s}^{-1}$.

Observando as Figuras 7, 8 e 9 verifica-se que o aumento da temperatura do ar, para uma mesma velocidade do ar de secagem, promove uma maior taxa de redução de água (TRA) dos grãos de cártamo, sendo que a TRA vai diminuindo no decorrer da secagem, conforme diminui o teor de água do produto, em que os valores de TRA no final do processo, para o presente trabalho, apresentam-se próximos, porém quanto maior a temperatura do ar ligeiramente maior são os valores de TRA.

Ainda analisando as mesmas figuras verifica-se que para uma mesma temperatura, as magnitudes da TRA, no início da secagem aumentam conforme se eleva a velocidade do ar de secagem. Comportamento este, não observado na fase final do processo.

Segundo Babalis et al. (2006) a velocidade do ar de secagem tem maior importância no início do processo, devido a evaporação da água ocorrer inicialmente na superfície do produto, sendo assim afetada com mais intensidade pela velocidade do ar. A evaporação da água inicialmente na superfície do produto é gradativamente substituída por uma frente de evaporação que se desloca para o interior do produto. Com isso o efeito da velocidade do ar é sucedido pelo processo de difusão líquida, o qual se torna o fator mais importante para o processo de secagem.

Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes do modelo de Page ajustados aos dados observados durante a secagem em camada delgada dos grãos de cártamo para as diferentes combinações de temperatura e velocidades do ar.

TABELA 5. Parâmetros do modelo de Page para as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem dos grãos de cártamo.

T (°C)	0,4 m s ⁻¹		1,0 m s ⁻¹		1,6 m s ⁻¹	
	k	n	k	n	k	n
40	0,6291	0,7920	0,7093	0,7869	0,7875	0,7586
50	0,8881	0,8976	1,0642	0,8416	1,2946	0,8442
60	1,6308	0,9357	1,8140	0,8618	1,9362	0,8665
70	2,5116	0,9288	2,7054	0,8132	2,7614	0,7871
80	3,1706	0,8546	3,1633	0,7653	3,2702	0,7419

As magnitudes da constante de secagem “k”, do modelo de Page, aumentou de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem em um mesma velocidade do ar (Tabela 5). O mesmo comportamento foi observado com o aumento da velocidade do ar de secagem para uma mesma temperatura do ar, embora tenha sido ligeiramente menor para a temperatura de 80 °C para a velocidade do ar de 1,0 m s⁻¹ com relação a 0,4 m s⁻¹. A constante de secagem “k” pode ser usada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura, e está relacionado com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente, sendo que a difusão líquida controla o processo (BABALIS & BELESSIOTIS, 2004).

A tendência definida da constante “k” apresentada na Tabela 5 reforça os resultados apresentados nas Figuras 7, 8 e 9 indicando aumento da taxa de redução de água com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

O coeficiente “n” do modelo de Page, o qual reflete a resistência interna do produto a secagem (GONELI et al., 2009), não apresentou tendência definida com o aumento da temperatura em uma mesma velocidade do ar de secagem, mas nota-se que com exceção das temperaturas de 50 e 60 °C houve redução nas magnitudes deste coeficiente para a mesma temperatura ao aumentar a velocidade do ar. Ao calcular a média dos valores do coeficiente “n”, de todas as temperaturas para uma mesma velocidade do ar, notou-se que os valores médios do coeficiente “n” diminuem com o aumento da velocidade do ar.

Devido a tendência definida da constante “k” em função da temperatura e da velocidade do ar, a mesma pode ser descrita pela Equação 20. A tendência definida dos valores médios do coeficiente “n” em função da velocidade do ar pode ser descrita pela Equação 21.

$$k = -2,2518 + 0,2033V + 0,0656T \quad (R^2 = 0,9833) \quad (20)$$

$$n = -0,0684V + 0,9002 \quad (R^2 = 0,7491) \quad (21)$$

As Equações 20 e 21 utilizadas para expressar os valores da constante “k” e do coeficiente “n” do modelo de Page em função da temperatura e velocidade do ar de secagem apresentaram ajustes satisfatórios, com valores razoáveis do coeficiente de determinação (R^2).

Substituindo as Equações 1, 20 e 21 na Equação 8 arranja-se a Equação 22, com a qual é possível estimar o teor de água dos grãos de cártamo em função do tempo, temperatura e velocidade do ar, para a faixa de temperatura e velocidade do ar de secagem estudada neste trabalho.

$$U = U_e + (U_i - U_e) \exp \left[(-2,2518 + 0,2033V + 0,0656T) \theta^{(-0,0684V + 0,9002)} \right] \quad (22)$$

em que:

θ : tempo de secagem, h;

T: temperatura do ar de secagem, °C; e

V: velocidade do ar de secagem, $m s^{-1}$.

2.3.1 Determinação do coeficiente de difusão efetivo

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios do coeficiente de difusão efetivo obtidos durante a secagem dos grãos de cártamo para as diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem, considerando o raio equivalente de 2,16 mm.

TABELA 6. Coeficiente de difusão efetivo (D) ajustado as diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem em camada delgada dos grãos de cártamo.

Temperatura (°C)	D x 10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹		
	0,4 m s ⁻¹	1,0 m s ⁻¹	1,6 m s ⁻¹
40	3,9047	4,5646	5,2083
50	6,0608	7,6226	10,1290
60	12,4289	14,8400	15,9758
70	20,0215	25,2573	26,7958
80	28,6307	32,9926	35,9370

Os valores do coeficiente de difusão efetivo dos grãos de cártamo aumentam com o incremento da temperatura e velocidade do ar de secagem (Tabela 6). Goneli et al. (2009) explicam que havendo um aumento da temperatura a viscosidade da água diminui, sendo a viscosidade uma medida da resistência do fluido ao escoamento, as variações dessa propriedade implicam em alterações na difusão da água nos capilares dos produtos agrícolas, tornando favorável o deslocamento da água do interior para a superfície do produto. Os mesmos autores explicam ainda, que o aumento da temperatura também promove o aumento do nível das vibrações moleculares da água, contribuindo assim para que a difusão ocorra mais rapidamente.

O aumento do valor do coeficiente de difusão efetivo com a elevação da velocidade do ar de secagem pode ser atribuído ao fato da elevação da velocidade do ar colaborar com o processo de evaporação da água conduzida para a superfície do produto. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores estudando diversos produtos agrícolas, como em grãos de sorgo (RESENDE et al., 2014), bagaço de cenoura (KUMAR et al., 2011), nozes de pistachio (KASHANINEJAD et al., 2007), folhas de hortelã verde e urtiga (KAYA e AYDIN, 2009).

As variações dos valores do coeficiente de difusão efetivo para os grãos de cártamo, nas diferentes condições do ar de secagem, ficaram entre $3,9047$ e $35,9370 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas e velocidades do ar de $40 \text{ }^\circ\text{C} - 0,4 \text{ m s}^{-1}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C} - 1,6 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, utilizando o raio equivalente inicial dos grãos. De acordo com Madamba et al. (1996), os valores do coeficiente de difusão, para a secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de 10^{-9} a $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, estando os valores calculados de difusão efetiva para os grãos de cártamo situados na faixa de valores relatados por esses autores.

2.3.2 Influência da temperatura

Na Figura 10 são apresentados os valores de $\ln(D)$ em função do inverso da temperatura absoluta obtido para os grãos de cártamo nas diferentes condições do ar de secagem.

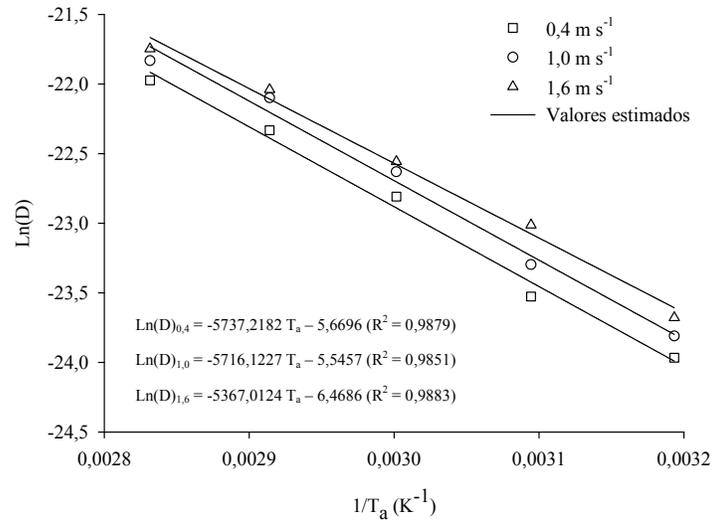


FIGURA 10. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função das diferentes temperaturas e para as diferentes velocidades do ar durante a secagem dos grãos de cártamo.

A dependência dos valores do coeficiente de difusão efetivo aumentaram linearmente com relação ao incremento da temperatura e velocidade do ar de secagem (Figura 10), comportamento semelhante foi observado por Resende et al. (2014). Com a inclinação da curva da representação de Arrhenius obtém-se a relação E_a/R , enquanto que com a sua interseção com o eixo das ordenadas obtém-se o valor de D_0 . As Equações 24, 25 e 26 apresentam os coeficientes da equação de Arrhenius ajustadas para o coeficiente de difusão efetivo dos grãos de cártamo para as velocidades do ar de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente, calculados de acordo com a Equação 14.

$$D_i = 3,4491 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{47,6992}{R T_a}\right) \quad (24)$$

$$D_i = 3,9042 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{47,5238}{R T_a}\right) \quad (25)$$

$$D_i = 1,5515 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{44,6213}{R T_a}\right) \quad (26)$$

A energia de ativação para difusão líquida, para o intervalo de temperatura de 40 a 80 °C, durante a secagem dos grãos de cártamo foi de

aproximadamente 47,70; 47,52 e 44,62 kJ mol⁻¹ (Equações 24, 25 e 26), para as velocidades do ar de secagem de 0,4; 1,0 e 1,6 m s⁻¹, respectivamente.

Os valores de energia de ativação tiveram suas magnitudes reduzidas conforme aumentou-se a velocidade do ar de secagem, esse comportamento foi observado em frutos de azeitona russa (Mayvan et al., 2012). A redução dos valores de energia de ativação pode ser atribuída a facilidade com que a água do produto foi evaporada com o aumento da velocidade do ar de secagem, que conseqüentemente, também aumentou o processo de difusão de água nos grãos de cártamo.

Segundo Kashaninejad et al. (2007) a energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto. Quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto durante o processo de secagem (CORRÊA et al., 2007; GONELI et al., 2009, FARIA et al., 2012; MORAIS et al., 2013), corroborando assim com os resultados obtidos no presente trabalho, em que, com o aumento da difusividade de água no produto devido ao aumento da velocidade do ar de secagem (Tabela 6), reduziu as magnitudes da energia de ativação (Equações 24, 25 e 26).

A energia de ativação calculada para os grãos de cártamo, no presente trabalho, apresentou valores superiores aos de alguns outros produtos oleaginosos, como sementes de cambre 37,07 kJ mol⁻¹ (COSTA et al., 2011), grãos de amendoim 31,27 kJ mol⁻¹ (ARAUJO, 2013), canola 28,47 kJ mol⁻¹ (DUC et al., 2011), nabo forrageiro 24,78 kJ mol⁻¹ (SOUSA et al., 2011), sementes de pinhão manso 15,78 kJ mol⁻¹ (RESENDE et al., 2011), grãos de mamona 15,25 kJ mol⁻¹ (GONELI, 2008). Os diferentes valores de energia de ativação para os diferentes produtos são função das características físicas, químicas e biológicas, e até mesmo das diferentes condições de secagem a qual o produto é submetido. Segundo ZOGZAS et al. (1996), os valores de energia de ativação para produtos agrícolas variam de 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, logo os valores de energia de ativação encontrados no presente trabalho estão situados nesta faixa.

Na Tabela 7 são apresentados os valores das propriedades termodinâmicas, entalpia específica, entropia específica e energia livre de Gibbs, calculadas durante o processo de secagem dos grãos de cártamo para as diferentes condições do ar de secagem.

TABELA 7. Propriedades termodinâmicas do processo de secagem dos grãos de cártamo nas diferentes condições do ar de secagem.

Velocidade (m s ⁻¹)	Temperatura (°C)	Entalpia específica (kJ mol ⁻¹)	Entropia específica (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	Energia livre de Gibbs (kJ mol ⁻¹)
0,4	40	45,0956	-0,2925	136,6799
	50	45,0125	-0,2927	139,6058
	60	44,9293	-0,2930	142,5342
	70	44,8462	-0,2932	145,4651
	80	44,7631	-0,2935	148,3984
1,0	40	44,9202	-0,2914	136,1819
	50	44,8371	-0,2917	139,0974
	60	44,7540	-0,2919	142,0155
	70	44,6708	-0,2922	144,9361
	80	44,5877	-0,2924	147,8591
1,6	40	42,0177	-0,2991	135,6821
	50	41,9346	-0,2994	138,6744
	60	41,8514	-0,2996	141,6692
	70	41,7683	-0,2999	144,6665
	80	41,6852	-0,3001	147,6663

Os valores de entalpia específica, para uma mesma velocidade do ar de secagem, reduzem conforme aumenta a temperatura do ar (Tabela 7), e ainda, observa-se também, que os valores de entalpia específica, para uma mesma temperatura do ar de secagem, reduzem conforme aumenta-se a velocidade do ar.

O comportamento observado para entalpia pode ser explicado devido ao aumento da temperatura do ar de secagem promover o aumento da pressão parcial de vapor da água contida nos grãos de cártamo, enquanto a propriedade psicrométrica pressão de vapor do ar permanece constante durante o processo de aquecimento do ar. Com isso aumentou-se a intensidade de movimentação de água do interior para a superfície do produto, em que o aumento da temperatura do ar aumentou a difusão efetiva de água nos grãos (Tabela 6). Sendo a energia necessária para a remoção de água dos produtos, que ocorre por difusão no processo de secagem, composta pela entalpia de vaporização da água livre e entalpia de vaporização da água no produto (calor isostérico) (GONELI et al., 2010).

Em todas as temperaturas e velocidades do ar, durante a secagem dos grãos de cártamo, o teor de água inicial e final foram os mesmos, com isso a energia necessária para quebrar as ligações de água com água e água com produto (calor isostérico) foi constante, ou seja, ocorreu variação somente na entalpia de vaporização da água livre. Com o aumento da temperatura do ar e da pressão parcial de vapor da água no interior do grão, e conseqüente redução da entalpia de

vaporização da água livre, a qual é depende da temperatura do ar, logo no balanço de entalpia final, ocorre a redução da entalpia no processo de difusão de água no produto durante o processo de secagem (ARAUJO, 2013).

Já o aumento da velocidade do ar de secagem promoveu um maior arrasto das camadas de ar mais saturadas em torno do produto, substituindo-as por outras menos saturadas, favorecendo o processo de evaporação, colaborando também para reduzir a energia gasta no processo de remoção de água. Estes resultados indicam que quanto maior a temperatura e velocidade do ar de secagem, menor é a energia necessária para que o processo de secagem ocorra, conforme explicam Oliveira et al. (2010), que dizem que quanto menor os valores de entalpia menor a energia necessária para remover a água ligada ao produto.

A entropia é uma grandeza termodinâmica que pode ser associada ao grau de desordem e a movimentação aleatória das moléculas de água, em que seus valores se elevam durante um processo natural em um sistema isolado (GONELI et al., 2010). A entropia específica dos grãos de cártamo, para uma mesma velocidade do ar, teve seus valores reduzidos conforme houve aumento da temperatura do ar de secagem (Tabela 7). Segundo Corrêa et al. (2010), este comportamento é um fenômeno esperado, pois valores de temperatura mais baixo acarreta em menor excitação das moléculas de água, resultando num aumento da ordem do sistema água-produto, ou seja, a elevação da temperatura do ar de secagem aumenta a pressão parcial de vapor da água nos grãos de cártamo e diminui a viscosidade da água no mesmo, fatores estes que proporcionam o aumento da difusão de água no produto, reduzindo os valores de entropia. Os valores negativos de entropia podem estar atribuídos à existência de adsorção química e/ou modificações estruturais do adsorvente (MOREIRA et al., 2008).

Analisando ainda os valores de entropia, nota-se que para uma mesma temperatura, na velocidade de $1,6 \text{ m s}^{-1}$ os seus valores apresentaram redução com relação as velocidades de $0,4$ e $1,0 \text{ m s}^{-1}$, porém os valores de entropia entre essas duas últimas velocidades foram bem próximos, em relação a uma mesma temperatura do ar, sendo ligeiramente maiores na velocidade de $1,0 \text{ m s}^{-1}$. A maior velocidade do ar influenciou no grau de excitação das moléculas de água, aumentando o grau de desordem do sistema.

A energia livre de Gibbs dos grãos de cártamo durante a secagem, diferente da entalpia e entropia específicas, para uma mesma velocidade do ar,

tiveram seus valores elevados conforme aumentou a temperatura do ar de secagem (Tabela 7). Conforme discutido para a entalpia e entropia, o aumento da temperatura do ar promove aumento da difusão de água nos grãos de cártamo, indicando maior trabalho realizado durante o processo de secagem. Segundo Nkolo Meze'e et al. (2008) a energia livre de Gibbs é atribuída ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis. Os valores positivos da energia livre de Gibbs indicam que a secagem dos grãos de cártamo não foi um processo espontâneo (NKOLO MEZE'E et al. 2008), esses valores positivos caracterizam uma reação não espontânea.

O aumento da velocidade do ar de secagem, para uma mesma temperatura, promoveu a redução dos valores de energia livre de Gibbs (Tabela 7), indicando que quanto maior a velocidade do ar menor o trabalho necessário para que o processo de secagem ocorra. Conforme discutido para entalpia, ao elevar a velocidade do ar de secagem promove o arrasto das camadas de ar mais saturadas em torno do produto, favorecendo o processo de evaporação.

2.4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

1 - Dentre os modelos de ajustados, o modelo da Aproximação da Difusão, Dois Termos, Exponencial de Dois Termos, Henderson e Pabis modificado, Logarítmico, Midilli e Page apresentaram ajustes satisfatórios aos dados experimentais para todas as condições do ar de secagem, sendo selecionado o modelo de Page para representar as curvas de secagem dos grãos de cártamo;

2 - O aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem promoveu o aumento da taxa de redução de água durante o processo de secagem, porém o aumento da velocidade do ar teve seu efeito mais pronunciado apenas no início do processo de secagem;

3 - O coeficiente de difusão efetivo teve seus valores elevados conforme aumentou a temperatura e a velocidade do ar de secagem, apresentando valores entre 3,9047 e $35,9370 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;

4 - A energia de ativação, para a faixa de temperatura de 40 a 80 °C, teve suas magnitudes reduzidas conforme aumentou a velocidade do ar para a secagem dos grãos de cártamo; e

5 - O aumento da temperatura do ar de secagem promoveu a redução dos valores da entalpia e entropia específica, enquanto os valores da energia livre de Gibbs apresentaram comportamento oposto. Já o aumento da velocidade do ar de secagem, para uma mesma temperatura, promoveu a redução dos valores de entalpia específica e energia livre de Gibbs, enquanto que para a entropia específica não foi observado comportamento definido.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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, n.3, p.449-458, 2004.

BABALIS, S.J.; PAPANICOLAOU, E.; KYRIAKIS, N.; BELESSIOTIS, V.G. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). **Journal of Food Engineering**, v.75, n.2, p.205-214, 2006.

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

CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v.25, n.1, p.134-142, 2001.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; CARVALHO, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v.57, n.5, p.595-601, 2010.

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, n.2, p.501-510, 2007.

COŞGE, B.; GÜRBÜZ, B.; KIRALAN, M. Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter. **International Journal of Natural and Engineering Sciences**, v.1, n.3, p.11-15, 2007.

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.

DAJUE, L.; MÜNDEL, H.H. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. **International Plant Genetic Resources**, Italy, 1996. 83p.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 712p.

DUC, L.A.; HAN, J.W.; KEUM, D.H. Thin layer drying characteristics of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Journal of Stored Products Research**, v.47, n.1, p.32-38, 2011.

- EKIN, Z. Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Utilization: A Global View. **Journal of Agronomy**, v.4, n.2, p.83-87, 2005.
- EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the Underutilized and Neglected Crop: A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.9, n.6, p.299-306, 2010.
- FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, 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. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- 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**, Especial Café - Viçosa - MG, 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**, v.53, n.1, p.191-197, 2010.
- GOUVEIA, J.P.G.; MOURA, R.S.F.; ALMEIDA, F.A.C.; OLIVEIRA, A.M.V.; SILVA, M.M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.471-474, 2002.
- JAIN, R.K.; BAL, S. Properties of pearl millet. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.66, n.2, p.85-91, 1997.
- JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, v.92, n.2, 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, n.1, p.98-108, 2007.
- KAYA, A.; AYDIN, O. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves. **Energy Conversion and Management**, v.50, n.1, p.118-124, 2009.
- KEEY, R.B. **Drying: Principles and practice**. New York: Pergamon Press, 1972. 358p.
- KUMAR, N.; SARKAR, B.C.; Sharma, H.K. Effect of air velocity on kinetics of thin layer carrot pomace drying. **Food Science and Technology International**, v.17, n.5, p.459-469, 2011.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.

- MARTINAZZO, A.P.; MELO, E.C.; CORREA, 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 medicinais**, v.12, n.4, p.488-498, 2010.
- MAYVAN, A.A.; MOTEVALI, A.; GHOBADIAN, B.; KHOSHTAGHAZA, M.H.; MINAEI, S. Effect of Air Velocity and Temperature on Energy and Effective Moisture Diffusivity for Russian Olive (*Elaeagnus gangetica* L.) in Thin-Layer Drying. **Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering**, v.31, n.1, p.65-69. 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**, v.38, n.5, p.505-510, 2005.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, n.4, p.513-518, 2005.
- MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.3, p.455-463, 2013.
- MOREIRA R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v.88, n.4, p.514-521, 2008.
- MUHIDONG, J.; MURSALIM; RAHMAN, A. The effect of air flow rate on single-layer drying characteristics of Arabica coffee. **International Food Research Journal**, v.20, n.4, p.1633-1637, 2013.
- NAYAK, L.; PANDEY, J.P. Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice. **Journal of the Institution of Engineers**, v.80, p.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. Léonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, v.468, n.1-2, p.1-5, 2008.
- OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SOUSA, K.A.; CAMPOS, R.C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, n.1, p.50-56, 2013.
- OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; VALENTE, D.S.M.; BOTELHO, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, n.3, p.546-554, 2010.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

- OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of halzenuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, n.4, p.225-233, 1999.
- PADILHA, A.C.M.; GOLLO, S.S.; SILVA, M.N. **Estudos na Cadeia Produtiva do Biodiesel**. Jaguarão/RS: Unipampa, 2012. 255p.
- PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v.52, n.4, p.349-357, 2002.
- PARK, K.J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F.P.R.. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Jornal of Food Engineering**, v.51, n.3, p.193-199, 2002.
- PEREZ, L.G.; OLIVEIRA, F.M.N.; ANDRADE, J.S.; MOREIRA FILHO, M. Cinética de secagem da polpa cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) pré desidratada por imersão-impregnação. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.102-106, 2013.
- RESENDE, O.; OLIVEIRA, D.E.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, J.; BESSA, V. Kinetics and thermodynamic properties of the drying process of sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) grains. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.32, p.2453-2462, 2014.
- RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V.C.; CHAVES, T.H.; FERREIRA, L.U. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1123-1135, 2011.
- RODRIGUES, M.E.A.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M. Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.2, p.141-147, 2002.
- SARSAVADIA, P.N.; SAWHNEY, R.L.; PANGAVHANE, D.R.; SINGH, S.P. Drying behaviour of brined onion slices. **Journal of Food Engineering**, v.40, n.3, p.219-226, 1999.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Drying kinetics of *Jatropha* seeds. **Revista Ceres**, v.59, n.2, p.171-177, 2012.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Mathematical modelling of the drying of *Jatropha* fruit: an empirical comparison. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.278-285, 2013.
- SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.4, p.883-892, 2011.
- 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, n.1-2, p.49-56, 2000.
- VILELA, C.A.A.; ARTUR, P.O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.2, p.387-394, 2008.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.

CAPÍTULO 3

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE CÁRTAMO

3.1 INTRODUÇÃO

No Brasil e em diversos países do mundo há uma crescente busca por fontes alternativas ou renováveis de energia, dentre elas se destaca a produção de biodiesel, com fim de reduzir o uso de combustíveis derivados do petróleo. Inúmeras culturas se destacam como fonte de matéria prima para a produção de biodiesel, dentre elas o cártamo, apresentando um teor de óleo situado na faixa de 20 à 45%, e de excelente qualidade, com rendimento semelhante a soja e ao girassol (0,4 a 0,6 toneladas de óleo por hectare), e ainda, a cultura apresenta grande capacidade de desenvolvimento em condições adversas de clima e solo (COŞGE et al., 2007; PADILHA et al., 2012).

O cártamo apesar de ainda ser uma cultura de pouca expressão no cenário agrícola brasileiro, apresenta um grande potencial para ser uma cultura muito popular no Brasil, não só devido ao seu óleo servir de matéria prima para a produção de biodiesel, mas também por suas diversas aplicações, como para fins alimentícios, tanto animal como humano, e industrial (EKIN, 2005; EMONGOR, 2010; PADILHA et al., 2012), sendo ainda uma cultura com grande capacidade de desenvolvimento em diferentes regiões do Brasil, desde o nordeste ao centro-oeste. Outro fator relevante para o seu sucesso é que a implantação da cultura, tratos culturais e colheita podem ser mecanizados, sem que seja necessária aquisição de máquinas específicas para a cultura, e ainda é uma opção de cultivo para a agricultura familiar.

Como a maioria dos produtos agrícolas, o cártamo, é colhido com o teor de água elevado visando reduzir as perdas e o ataque de insetos e microrganismos a campo, necessitando assim, ser submetido ao processo de secagem. A redução do teor de água, por meio da secagem, é um importante processo na cadeia produtiva, proporcionando condições adequadas para um armazenamento seguro do produto por longos períodos de tempo. A secagem é um complexo processo envolvendo a

transferência simultânea de calor e massa entre o produto e o ar, resultando em mudanças significativas na composição química, estrutura e propriedades físicas dos alimentos (KOÇ et al., 2008).

Segundo Goneli et al. (2011) as propriedades físicas e geométricas, como a massa específica, porosidade, tamanho, volume, entre outras propriedades físicas, são informações de suma importância para projetar e dimensionar máquinas e equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas, bem como para estudos envolvendo a transferência de calor e massa, e movimentação de ar em massas granulares. Sendo o cártamo uma cultura ainda pouco estudada e com potencial crescente de produção no Brasil, o levantamento destas propriedades físicas é relevante para o sucesso das etapas de pós-colheita do grão.

O conhecimento da massa específica aparente e a massa específica real ou unitária, juntamente com a porosidade, a qual pode ser obtida indiretamente pela relação entre a massa específica aparente e unitária, são muito importantes para auxiliar no dimensionamento de moegas, armazéns e silos para grãos e sementes, e em equipamentos de separação e classificação (TAVAKOLI et al., 2009). A massa específica aparente e real fornece informações do volume ocupado e massa do produto, o que facilita o planejamento e dimensionamento do volume estrutural das unidades armazenadoras, e até mesmo de transportadores de grãos.

A massa específica de grãos ou sementes é fortemente influenciada pela variação do teor de água, forma e superfície do tegumento, em que produtos com tegumento mais rígido tendem a reduzir o seu volume em menor intensidade durante o processo de secagem, interferindo diretamente no comportamento da massa específica.

A porosidade intergranular é a relação entre o volume total ocupado pelo ar em uma massa de grãos pelo volume dessa massa, sendo normalmente expresso em porcentagem. As características físicas, como tamanho e forma da superfície do produto podem afetar a porosidade da massa, além de que produtos com a superfície rugosa tendem a apresentarem maior porosidade do que produtos com a superfície lisa (ARAUJO et al., 2014).

A porosidade de uma massa de grãos também pode ser afetada pela variação do teor de água, visto que, normalmente com a redução do teor de água ocorre a redução do volume dos grãos, fazendo com que os mesmos se arranjem, na massa, de modo com que possa diminuir ou até mesmo aumentar o volume ocupado

pelo ar na massa de grãos. A massa específica aparente e a porosidade são informações fundamentais no desenvolvimento de sistemas de aeração e secagem, pois estas propriedades estão diretamente relacionadas à resistência que a massa de grãos impõe ao fluxo de ar (ZEWDU & SOLOMON, 2007).

Informações a respeito da morfologia, tamanho (comprimento, largura, espessura, diâmetro aritmético médio e diâmetro geométrico médio) e forma de sementes são fundamentais para projetar adequadamente equipamentos para limpeza, classificação e separação, além de serem importantes para projetar máquinas destinadas à colheita e moagem (SHARMA et al., 2011). Segundo Sirisomboon et al. (2007) o tamanho (área superficial, área projetada e volume) e a forma (esfericidade e circularidade) de frutos, nozes e sementes são importantes para o desenvolvimento de equipamentos destinados ao processo de descasque, além de determinar o limite inferior para o tamanho de transportadores, como fitas transportadoras, elevadores de canecas e transportadores helicoidais.

A redução das dimensões características de grãos e sementes é chamada de contração volumétrica, sendo a principal causa desse efeito a redução do teor de água dos mesmos por meio do processo de secagem. A contração volumétrica raramente é insignificante durante o processo de desidratação (KOÇ et al., 2008), sendo normalmente, o volume a característica física que mais sofre variação durante o processo de secagem.

O encolhimento ou contração dos produtos agrícolas durante a secagem normalmente é avaliado pelo índice de contração volumétrica, o qual determina a relação entre o volume e o volume inicial para determinados teores de água do grão ou semente. A análise desse índice é muito importante durante o processo de secagem, pois assim é possível estimar a variação do volume ocupado pela massa de grãos, conforme reduz o teor de água (SIQUEIRA et al., 2012a).

Devido a grande importância da secagem para a pós-colheita, dos grãos e sementes, e da variação das propriedades físicas destes em função da redução do teor de água, vários pesquisadores vêm estudando o comportamento das mesmas, como em grãos de amendoim (ARAUJO et al., 2014), em sementes e frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012a, 2012b e 2012c), frutos de mamona (GONELI et al., 2008 e 2011), grãos de feijão (RESENDE et al., 2005 e 2008; JESUS et al., 2013), sementes de girassol (ISIK & IZLI, 2007; SEIFI & ALIMARDANI, 2010a;

TARIGHI et al., 2011a), grãos de soja (GUEDES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2013), grãos de cártamo (SEIFI et al., 2010; TARIGHI et al., 2011b).

Visto a cultura do cártamo como promissora no Brasil, devido a diversidade de usos de seu óleo, e com o advento da busca de fontes de matéria prima para a produção do biodiesel, é de suma importância o levantamento de informações referentes às propriedades físicas desta cultura, possibilitando o desenvolvimento e otimização do uso de equipamentos destinados a sua pós-colheita. Essas informações também são muito importantes para auxiliar nas regulagens de colhedoras, sendo uma das vantagens da cultura do cártamo, com relação há algumas outras oleaginosas, a facilidade em sua colheita, podendo ser colhido com as mesmas máquinas utilizadas na colheita de tradicionais grãos, como milho e soja, bastando realizar alguns ajustes nestas máquinas, os quais podem ser otimizados com base no conhecimento das propriedades físicas.

Diante do exposto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as principais propriedades físicas dos grãos de cártamo, como: massa específica aparente e unitária, porosidade, massa de mil grãos, forma e tamanho, e o índice de contração da massa e unitária dos grãos de cártamo em função da variação do teor de água.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, da Faculdade de Ciências Agrárias - FCA, pertencente à Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, no município de Dourados, MS.

Foram utilizados grãos de cártamo cultivados na Fazenda Experimental da UFGD. Durante o desenvolvimento da cultura do cártamo foram realizados todos os tratos culturais necessários para o bom desenvolvimento da cultura até a sua colheita.

Os capítulos de cártamo foram colhidos manualmente, selecionando apenas os que já haviam atingido a maturação. A debulha foi manual seguida de uma nova seleção, retirando-se todos aqueles defeituosos, no intuito de evitar qualquer tipo de influência indesejável que pudesse interferir nos resultados da pesquisa.

Após a debulha os grãos de cártamo foram acondicionados em embalagem plástica e armazenados em câmara do tipo B.O.D. à temperatura de 3,5 °C, para evitar troca de água na forma de vapor entre o produto e o ambiente externo, visando assim, manter e homogeneizar o teor de água do produto. Os grãos de cártamo apresentaram teor de água inicial de aproximadamente 0,445 decimal b.s. (base seca).

Os grãos de cártamo foram secos em estufa com circulação forçada de ar, a temperatura de 40 °C, com o único propósito de reduzir o teor de água dos grãos. A redução do teor de água, para a determinação da contração da massa e da massa específica aparente, foi acompanhada com o auxílio de uma balança com resolução de 0,01 g, enquanto que para as demais propriedades físicas foram acompanhadas com balança com resolução de 0,001 g, pelo método gravimétrico (perda de massa), até os grãos atingirem o teor de água final de $0,073 \pm 0,008$ decimal b.s.. Os teores de água, inicial e final, dos grãos de cártamo foram determinados pelo método gravimétrico em estufa, a 105 ± 1 °C, durante 24h, em duas repetições (BRASIL, 2009).

3.2.1 Massa específica aparente e unitária

A massa específica aparente (ρ_{ap}) para os grãos de cártamo foi determinada utilizando uma balança de peso hectolítrico, com volume de 250 mL. Para cada teor de água amostrado, durante a secagem, foram realizadas cinco medições para a determinação da massa específica aparente. Em cada medição foi preenchido o volume da balança de peso hectolítrico com grãos de cártamo e determinado a massa do volume de produto em uma balança com resolução de 0,01 g. A massa específica aparente resultou da média das cinco repetições, para cada teor de água amostrado, sendo esse valor médio, obtido na balança de peso hectolítrico, multiplicado por quatro, para expressar a massa específica aparente em kg m^{-3} .

Para a determinação da massa específica unitária ou real (ρ_u) foram escolhidos, ao acaso, 18 grãos de cártamo e secos individualmente. Para cada teor de água amostrado durante o processo de secagem foi realizado, com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, as medições dos diâmetros perpendiculares do produto, comprimento (a), largura (b) e espessura (c), conforme ilustra a Figura 1.

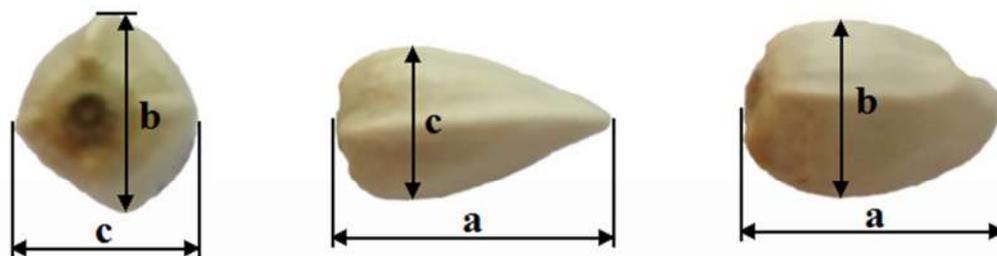


FIGURA 1. Representação dos diâmetros perpendiculares dos grãos de cártamo.

Para a determinação do volume de cada grão de cártamo, ao longo do processo de secagem, foi utilizada a Equação 1, proposta por Jain & Bal (1997), considerando a forma do produto como um corpo cono-esférico.

$$V_g = \frac{\pi D^2 a^2}{6 (2a - D)} \quad (1)$$

onde:

$$D = (b \cdot c)^{0,5} \quad (2)$$

em que:

V_g : volume do grão, mm³;

a: comprimento ou maior dimensão, mm;

b: largura ou dimensão média, mm;

c: espessura ou menor dimensão, mm; e

D: média geométrica entre as medidas “b” e “c” do produto.

A seleção desta equação para calcular o volume do produto foi baseada em testes preliminares com tolueno, onde o volume real do grão foi comparado ao volume calculado por equações apresentadas na literatura, sendo a equação acima a mais representativa do volume real. Seifi et al. (2010) também fizeram uso da equação proposta por Jain & Bal (1997) para determinação do volume de grãos de cártamo, sendo também, a mesma equação, utilizada para determinação do volume de sementes de girassol (SEIFI & ALIMARDANI, 2010a; TARIGHI et al., 2011a) o qual possui forma física semelhante a do cártamo.

A partir do volume e da massa de cada grão, foi determinado a massa específica unitária pela Equação 3.

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_g} \cdot 10^6 \quad (3)$$

em que:

ρ_u : massa específica unitária, kg m⁻³; e

m_g : massa de um grão de cártamo, g.

3.2.2 Porosidade da massa

A porosidade da massa dos grãos de cártamo foi determinada indiretamente por meio da Equação 4.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) 100 \quad (4)$$

em que:

ε : porosidade, %; e

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

3.2.3 Massa de 1000 grãos

A massa de mil grãos foi determinada de acordo com a Regra de Análise de Sementes (BRASIL, 2009), em que foi realizada a escolha aleatória de 100 grãos de cártamo, em oito repetições, e determinada a massa dos grãos de cada repetição, com uma balança com resolução de 0,001 g. Os resultados obtidos para cada teor de água amostrado durante a secagem foram ajustados para 1000 grãos.

3.2.4 Forma e tamanho

A forma e o tamanho dos grãos de cártamo foram caracterizados pela esfericidade, circularidade, área superficial e área projetada, em 18 grãos de cártamo, por meio da medição dos diâmetros perpendiculares do produto, conforme descrito anteriormente para a determinação do volume do produto para calcular a massa específica unitária.

3.2.4.1 Esfericidade e circularidade

A esfericidade dos grãos de cártamo foi calculada de acordo com a Equação 5, conforme metodologia utilizada também por Zewdu & Solomon (2007).

$$E_s = \frac{D_e}{D_c} 100 \quad (5)$$

onde:

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6 V_g}{\pi}} \quad (6)$$

em que:

E_s : esfericidade, %;

D_e : diâmetro da esfera equivalente, mm; e

D_c : diâmetro da menor esfera circunscrita (maior dimensão do produto), mm.

A circularidade (C), em %, dos grãos de cártamo foi determinada pela Equação 7 (MOHSENIN, 1986).

$$C = \frac{b}{a} 100 \quad (7)$$

Além do diâmetro médio geométrico (D_g), em mm, o qual foi determinado pela Equação 8.

$$D_g = \sqrt[3]{a b c} \quad (8)$$

3.2.4.2 Área projetada

A área projetada (A_p), em mm^2 , dos grãos de cártamo foi determinada pela Equação 9.

$$A_p = \frac{\pi a b}{4} \quad (9)$$

3.2.4.3 Área superficial

A área superficial (S), em mm^2 , dos grãos de cártamo, foi determinada por dois diferentes métodos:

- Método proposto por Jain & Bal (1997), Equação 10, onde é levado em consideração o comprimento e a média geométrica da espessura e largura do produto.

$$S = \frac{\pi D a^2}{(2 a - D)} \quad (10)$$

- método descrito por Mohsenin (1986), Equação 11, no qual são realizados ajustes nas dimensões características do produto.

$$S = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{\pi a D}{2 e} \operatorname{sen}^{-1} e \quad (11)$$

onde:

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{D}{a}\right)^2} \quad (12)$$

em que:

e: excentricidade;

A relação entre a área superficial e o volume dos grãos de cártamo (SV), em mm^{-1} , foi determinada por meio da Equação 13.

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

A relação entre a área superficial (S_W), em mm^2 e massa dos grãos de cártamo foi determinada pela Equação 14 (MOHSENIN, 1986).

$$S_W = \xi W^d \quad (14)$$

em que:

ξ e d : constantes da relação, adimensionais; e

W: massa do produto, g.

3.2.5 Índice de contração da massa e unitária

Para a determinação do índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo foi calculada a razão entre o volume do produto em determinado instante pelo volume inicial do mesmo (Equação 15), no decorrer do processo de secagem, relacionando com a variação do teor de água do produto.

$$\Psi = \frac{V}{V_0} \quad (15)$$

em que:

Ψ : índice de contração, adimensional;

V : volume (da massa ou do grão) em determinado instante, mm^3 ; e

V_0 : volume inicial (da massa ou do grão), mm^3 .

O acompanhamento da redução do volume da massa foi realizado com base em um volume inicial de 500 cm^3 (500 mL) de grãos de cártamo, o qual foi verificado a redução desse volume, no decorrer da secagem, transferindo o mesmo para uma proveta de 500 mL , conforme Figura 2, e anotando o volume, em mL para diferentes teores de água durante a secagem. Para cada teor de água amostrado foi realizado seis determinações do volume da massa, na proveta de 500 mL , em que o volume da massa, para cada teor de água, foi determinado pela média das seis medições.



FIGURA 2. Ilustração da determinação da contração da massa dos grãos de cártamo durante a secagem, utilizando uma proveta de 500 mL .

Já o acompanhamento da redução do volume de cada grão de cártamo foi realizado por meio da medição dos diâmetros perpendiculares dos grãos, conforme já descrito para determinação da massa específica unitária no decorrer da secagem.

Aos dados experimentais do índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo foram ajustados os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para representar o índice de contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Designação do modelo	Modelo	
Bala e Woods modificado (1984)	$\psi = 1 - a \left\{ 1 - \exp \left[-b (U_0 - U) \right] \right\}$	(16)
Corrêa et al. (2004)	$\psi = 1 / \left[a + b \exp (U) \right]$	(17)
Exponencial	$\psi = a \exp (b U)$	(18)
Linear	$\psi = a + b U$	(19)
Polinomial	$\psi = a + b U + c U^2$	(20)
Rahman	$\psi = 1 + \beta (U - U_0)$	(21)

em que:

ψ : índice de contração, adimensional;

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

U_0 : teor de água inicial do produto, decimal b.s.;

a, b, c : parâmetros que dependem do produto, adimensional, e

β : coeficiente de contração volumétrica, adimensional.

3.2.6 Análise estatística

Os dados experimentais referentes a massa específica aparente e unitária, massa de mil grãos, porosidade e a análise da forma e tamanho dos grãos de cártamo, foram submetidos a análise de regressão linear. Para o ajuste dos modelos de regressão, utilizou-se o programa computacional SigmaPlot 11.0. Foram utilizados como critérios de seleção o nível de significância do modelo pelo teste F, juntamente com os valores do coeficiente de determinação (R^2).

Os dados experimentais de contração da massa e unitária foram submetidos à análise de regressão não linear e linear, pelo método de Gauss-Newton. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa computacional Statistica 8.0.

Os modelos para representar o índice de contração volumétrica foram selecionados considerando as maiores magnitudes do coeficiente de determinação (R^2), valores reduzidos do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). Os valores do erro médio relativo (P, em %) e do desvio padrão da estimativa (SE, em decimal) foram calculados conforme as Equações 22 e 23:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \right) \quad (22)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (23)$$

em que:

n: número de observações experimentais;

Y: valor observado experimentalmente;

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

GLR: graus de liberdade do modelo.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Propriedades físicas

Na Figura 3 são apresentados os valores observados e estimados da massa específica aparente dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

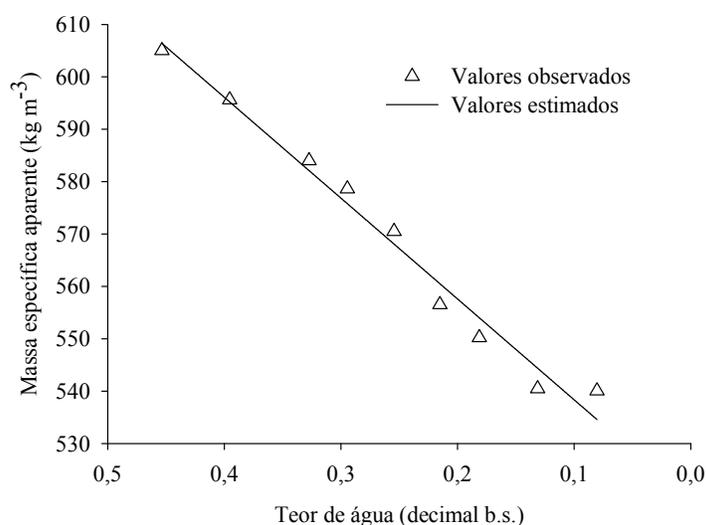


FIGURA 3. Valores observados e estimados da massa específica aparente dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Os valores da massa específica aparente reduziram conforme reduziu o teor de água dos grãos de cártamo (Figura 3), sendo que normalmente os produtos agrícolas apresentam comportamento contrário para essa propriedade (MILANI et al., 2007; RESENDE et al., 2008; TAVAKOLI et al., 2009; SEIFI & ALIMARDANI, 2010a; JESUS et al., 2013) . No entanto, Seifi et al. (2010) trabalhando com grãos de cártamo da variedade *Goldasht* verificaram comportamento semelhante ao encontrado no presente trabalho. Comportamento semelhante também foi observado para outros produtos, como sementes de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012b), sementes de melão (BANDE et al., 2012), grãos de pistáchio (RAZAVI et al., 2007).

Araujo et al. (2014) também observaram comportamento semelhante ao do presente trabalho para a massa específica aparente dos grãos de amendoim, da cultivar IAC 505 do grupo vegetativo e comercial Runner, em que a mesma reduziu seus valores no decorrer da secagem. Na ocasião os autores atribuíram esse efeito a uma maior contração na parte interna dos cotilédones do produto com relação as dimensões externas do mesmo, que contraem em menor proporção, formando espaços vazios no interior do grão, o qual foi verificado ao retirar a película que envolvia os grãos. Esse mesmo efeito foi verificado no presente trabalho, como pode ser observado na Figura 4, em que foi cortado um grão de cártamo antes de proceder a secagem (A) e outro após a secagem (B).

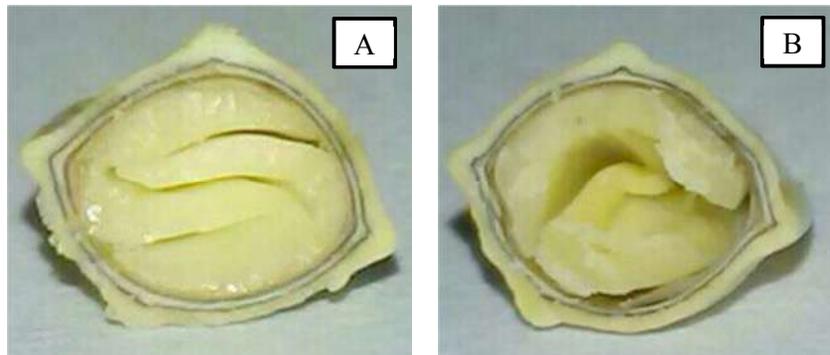


FIGURA 4. Grão de cártamo antes da secagem (A) e grão de cártamo após a secagem (B).

Os grãos de cártamo reduziram significativamente o endosperma durante a secagem (Figura 4), reduzindo também a massa do produto, enquanto que a parte externa do grão não reduziu na mesma proporção da parte interna. Com isso a massa específica diminui no decorrer da secagem, pois a mesma é uma relação entre a massa e o volume do produto. A menor redução do volume em relação a sua massa, também, pode ser atribuída a resistência do tegumento dos grãos dessa cultura à contração.

Os valores da massa específica aparente variaram de 605,03 a 540,06 kg m⁻³ (Figura 3), para uma faixa de teor de água de 0,45 à 0,08 decimal b.s., respectivamente, sendo esses valores representados satisfatoriamente por um modelo de regressão linear (Tabela 2).

Na Figura 5 são apresentados os valores observados e estimados da massa específica unitária ou real dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

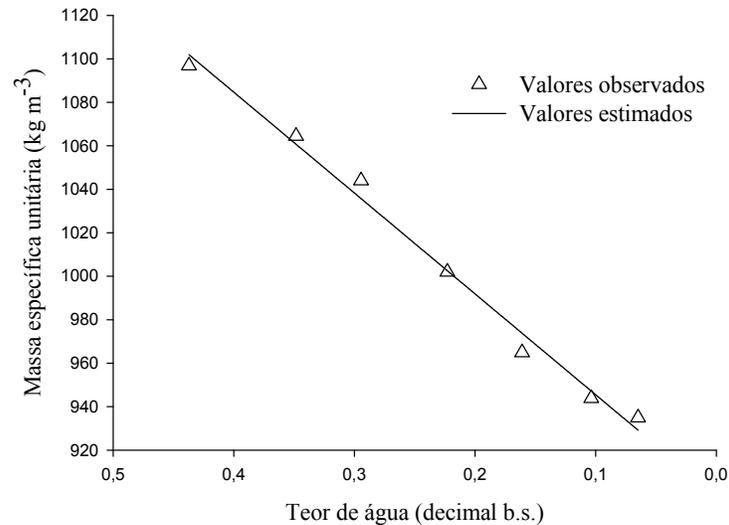


FIGURA 5. Valores observados e estimados da massa específica unitária dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Os valores da massa específica unitária dos grãos de cártamo reduziram no decorrer da secagem (Figura 5), evidenciando que a redução do volume do grão durante a secagem foi menos intensa do que a redução de sua massa, conforme já explicado, e ilustrado na Figura 4, para a massa específica aparente. Com isso a massa específica unitária dos grãos de cártamo apresentou comportamento semelhante ao da massa específica aparente. Comportamento semelhante ao observado no presente trabalho para a massa específica unitária foi encontrado para sementes de cucurbitáceas (MILANI et al., 2007), grãos de pistáchio (RAZAVI et al., 2007), sementes de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012b) e grãos de amendoim (ARAUJO et al., 2014).

A massa específica unitária dos grãos de cártamo (Figura 5), apresentaram variação em seus valores de 1096,88 a 934,95 kg m⁻³ para a faixa de teor de água de 0,44 a 0,06 decimal base seca, respectivamente, sendo a relação entre essas duas variáveis representadas por um modelo de regressão linear (Tabela 2).

Na Figura 6 são apresentados os valores observados, de maneira indireta, e os estimados para a porosidade da massa dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

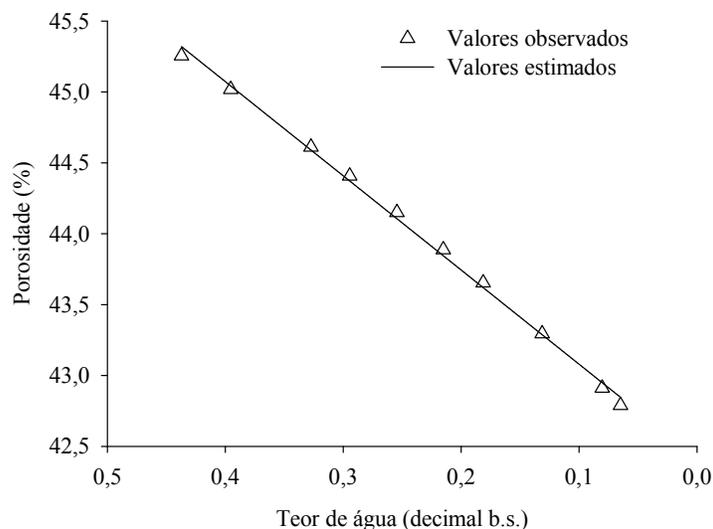


FIGURA 6. Valores observados e estimados da porosidade dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Os valores da porosidade da massa de grãos de cártamo reduziram no decorrer da secagem (Figura 6), comportamento esse comum para muitos produtos agrícolas (ISIK & IZLI, 2007; ZEWDU & SOLOMON, 2007; RESENDE et al., 2008; SEIFI & ALIMARDANI, 2010b; SIQUEIRA et al., 2012b). Esse comportamento pode ser explicado devido aos produtos agrícolas apresentarem como característica, com a redução do teor de água, a redução do seu volume, fazendo com que a massa do produto se compacte de modo a reduzir os espaços intergranulares.

Seifi et al. (2010) avaliando a porosidade da massa de grãos de cártamo da variedade *Goldasht* observaram comportamento contrário ao apresentado no presente trabalho, em que a porosidade da massa decresceu de 51,40 para 45,84%, durante um processo de reumedecimento, em que o teor de água variou de 0,04 à 0,28 decimal base seca. Enquanto no presente trabalho a porosidade reduziu de 45,25 para 42,79 % para a faixa de teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s. (Figura 6). A relação entre essas duas variáveis é representada satisfatoriamente por um modelo de regressão linear (Tabela 2), apresentando elevada significância.

Na Figura 7 são apresentados os valores observados e estimados para a massa de mil grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

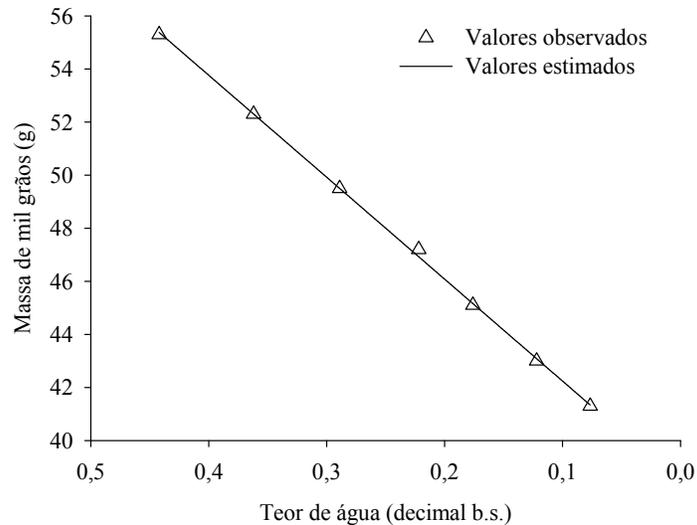


FIGURA 7. Valores observados e estimados da massa de mil grãos de cártamo em função do teor de água.

A massa dos grãos de cártamo reduz conforme diminui o teor de água dos mesmos (Figura 7), comportamento este esperado para qualquer produto agrícola durante a secagem. O processo de secagem remove parte da água ligada aos produtos agrícolas, com isso faz com que a massa dos mesmos seja reduzida.

Seifi et al. (2010) verificaram que a massa de mil grãos de cártamo da variedade *Goldasht* variam de 50,50 para 59,20 g para uma faixa de teor de água de 0,04 à 0,28 decimal b.s., enquanto no presente trabalho a massa de mil grãos variou de 55,30 para 41,30 g para uma faixa de teor de água de 0,44 à 0,07 decimal b.s., sendo este fenômeno representado por um modelo de regressão linear (Tabela 2), com elevado valor do coeficiente de determinação e nível de significância da regressão.

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

Variável analisada	Modelo	R ² (decimal)	F	P _{level}
Massa específica aparente (ρ_a)	$\rho_a = 192,5148 U + 519,0934$	0,9758	323,80	<0,0001
Massa específica unitária (ρ_u)	$\rho_u = 464,0546 U + 899,0666$	0,9884	510,16	<0,0001
Porosidade (ϵ)	$\epsilon = 6,6452 U + 42,4150$	0,9972	3176,72	<0,0001
Massa de mil grãos (M_{1000})	$M_{1000} = 38,4088 U + 38,4006$	0,9993	8149,59	<0,0001

U: teor de água (decimal b.s.).

3.3.2 Análise da forma e tamanho dos grãos

As dimensões características (a, b, c) e diâmetro médio geométrico (D_g) dos grãos de cártamo tiveram seus valores reduzidos em função da redução do teor de água (Tabela 3), assim como o volume (V_g) do produto. Um comportamento típico dos produtos agrícolas é a redução do volume durante o processo de secagem, que vem sendo observado por vários pesquisadores (RAZAVI et al., 2007; GONELI et al., 2008; KIBAR et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2012c; ARAUJO et al., 2014).

TABELA 3. Dimensões características (a, b, c), diâmetro médio geométrico (D_g), volume (V_g), índices de contração (a/a₀, b/b₀ e c/c₀), circularidade (C) e esfericidade (E) dos grãos de cártamo em função do teor de água.

U (b.s.)	Dimensões (mm)				V_g (mm ³)	Índices de contração			C (%)	E (%)
	a	b	c	D_g		a/a ₀	b/b ₀	c/c ₀		
0,44	7,35	5,09	4,19	5,39	59,87	1,00	1,00	1,00	69,26	66,03
0,35	7,30	5,04	4,13	5,34	57,88	0,99	0,99	0,99	68,99	65,71
0,29	7,28	5,00	4,10	5,30	56,67	0,99	0,98	0,98	68,68	65,44
0,22	7,26	4,97	4,08	5,28	55,78	0,99	0,98	0,97	68,52	65,34
0,16	7,24	4,95	4,05	5,25	54,98	0,98	0,97	0,97	68,31	65,17
0,10	7,21	4,89	4,01	5,21	53,44	0,98	0,96	0,96	67,82	64,81
0,06	7,19	4,84	3,97	5,17	52,05	0,98	0,95	0,95	67,28	64,43

U: teor de água (decimal b.s.).

Observando os índices de contração das dimensões características dos grãos de cártamo (Tabela 3), pode ser verificado que a largura (b) e espessura (c) contraíram na mesma proporção, aproximadamente 5,0%, com relação aos seus respectivos valores iniciais, enquanto o comprimento (a) contraiu aproximadamente 2,0%, menos da metade das outras dimensões, para uma faixa de teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s..

No trabalho realizado por Seifi et al. (2010), com grãos de cártamo, também foi observado que a dimensão do produto que reduziu menos foi o comprimento. O menor índice de contração do comprimento com relação ao da largura e espessura para os grãos de cártamo pode ser atribuído ao sentido das fibras do tegumento destes grãos, como pode ser observado na Figura 1, oferecendo assim, maior resistência a contração desta dimensão do produto.

Araujo et al. (2014) avaliando os índices de contração das dimensões características dos grãos de amendoim observaram comportamento semelhante ao

encontrado no presente estudo, em que uma das dimensões reduziu mais que as outras, porém nos grãos de amendoim a espessura foi a dimensão que reduziu mais acentuadamente, enquanto o comprimento e largura reduziram na mesma proporção. As contrações dos eixos ortogonais dos produtos agrícolas, normalmente, apresentam uma ligeira desuniformidade durante o processo de secagem, fato esse observado em outros produtos, como em frutos de mamona (GONELI et al., 2011), sementes de cucurbitáceas (MILANI et al., 2007), sementes de beterraba (DURSUN et al., 2007).

A circularidade dos grãos de cártamo reduziu aproximadamente 2,0% para a faixa de teor de água estudada (Tabela 3). A baixa redução dos valores de circularidade evidencia o baixo índice de contração da largura e comprimento dos grãos de cártamo, sendo que a circularidade, obtida no presente trabalho (Equação 7), é uma razão entre essas duas dimensões do grão. O maior índice de contração da largura em relação ao comprimento causou a redução da circularidade dos grãos de cártamo durante a secagem. Comportamento semelhante da circularidade foi observado por Siqueira et al. (2012c) em frutos de pinhão manso e por Goneli et al. (2011) em frutos de mamona.

A esfericidade apresentou comportamento semelhante ao da circularidade para os grãos de cártamo, em que, reduziu seus valores em aproximadamente 1,6% (de 66,03 para 64,43%), para uma faixa de teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s. (Tabela 3). Reumedecendo grãos de cártamo, Tarighi et al. (2011b) avaliando a esfericidade das variedades *Darab* e *Goldasht* verificaram que os valores de esfericidade variaram de 60 para 63% e de 66 para 68%, respectivamente, para uma faixa de teor de água de 0,04 à 0,28 decimal b.s., estando os valores de esfericidade encontrados no presente trabalho (Tabela 3) condizente com os valores relatos por esses autores.

Comportamento semelhante para a esfericidade, durante a secagem, também foi verificado por outros pesquisadores, em grãos de amendoim (ARAUJO et al., 2014), frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et., 2012c), frutos de mamona (GONELI et al., 2011). A circularidade e a esfericidade dos grãos de cártamo apresentam valores abaixo de 70%, independente do teor de água, não podendo ser classificados nem como circulares nem como esféricos.

Na Figura 8 são apresentados os valores observados e estimados da área projetada dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

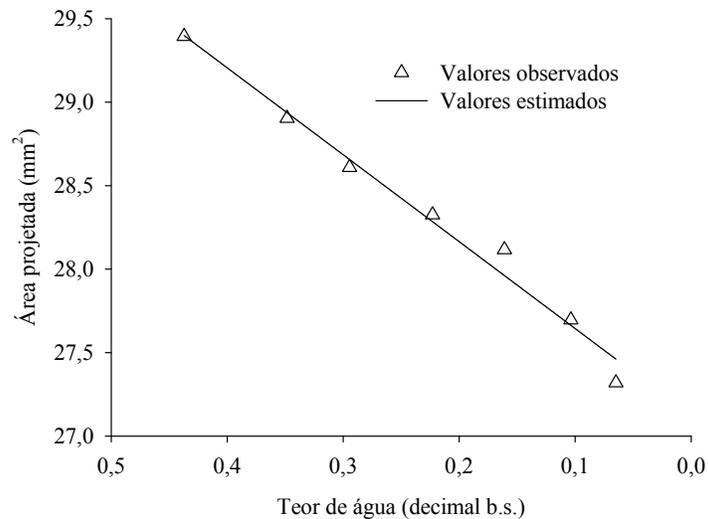


FIGURA 8. Valores observados e estimados da área projetada dos grãos de cártamo em função do teor de água.

A área projetada dos grãos de cártamo decresceu de 29,39 para 27,32 mm² com a redução do teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s. (Figura 8), sendo esta relação descrita satisfatoriamente por um modelo de regressão linear (Tabela 4). Este comportamento pode ser explicado devido ao fato dos grãos de cártamo sofrerem redução em suas dimensões características durante o processo de secagem (Tabela 3). A redução da área projetada durante a secagem, para produtos agrícolas, vem sendo observada por diversos pesquisadores para diversos produtos (DURSUN et al., 2007; GONELI et al., 2008; GUEDES et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012c; ARAUJO et al., 2014).

Os valores observados e estimados da área superficial dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem são apresentados na Figura 9.

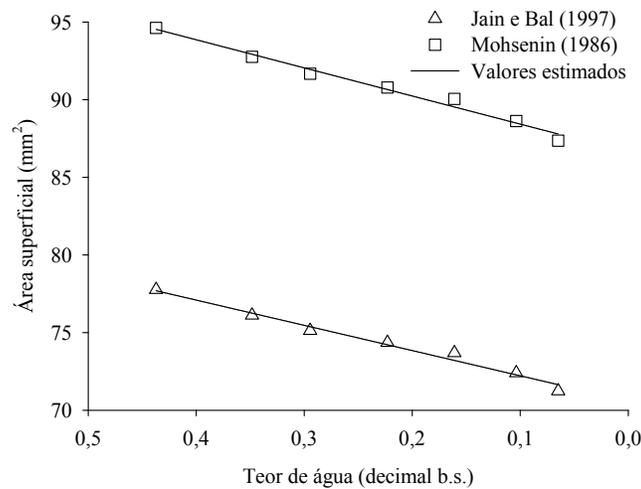


FIGURA 9. Valores observados e estimados da área superficial dos grãos de cártamo em função do teor de água.

A área superficial dos grãos de cártamo decresceu no decorrer do processo de secagem, conforme ilustrado na Figura 9, comportamento este observado para outros produtos agrícolas, como em grãos de amendoim (ARAUJO et al., 2014), frutos de pinhão manso (SIQUEIRA et al., 2012c), sementes de melão (BANDE et al., 2012) e grãos de arroz (KIBAR et al., 2011).

Pode ser observado na Figura 9 que independente da metodologia utilizada para determinar a área superficial dos grãos de cártamo, a mesma reduz em torno de 8%. A metodologia proposta por Mohsenin (1986) realiza ajustes nas dimensões características do produto (Equações 2, 11 e 12), o que leva a supor que os valores de área superficial obtidos por essa equação são mais próximos do real, enquanto a equação proposta por Jain & Bal (1997) subestima os valores de área superficial (Figura 9), quando comparado aos valores obtidos pelo método descrito por Mohsenin (1986).

Apesar do volume dos grãos de cártamo terem sido calculados pela equação proposta por Jain & Bal (1997), optou-se por utilizar a equação proposta por Mohsenin (1986) para calcular a área superficial, pelos motivos já citados anteriormente, além de que ao calcular a esfericidade dos grãos de cártamo pela equação proposta por Jain & Bal (1997), os mesmos apresentaram esfericidade superior a 94% independente do teor de água, o que não é condizente com a forma do produto, como pode ser observado na Figura 1. Esse fato também contribuiu por

optar em descartar a equação proposta por Jain & Bal (1997) para calcular a área superficial dos grãos de cártamo.

Os valores da área superficial (Figura 9), considerando a metodologia proposta por Mohsenin (1986), variaram de 94,63 para 87,36 mm² para uma faixa de teor água de 0,44 à 0,06 decimal b.s., sendo esta relação descrita por um modelo de regressão linear, com elevado valor de coeficiente de determinação (Tabela 4).

Na Figura 10 são apresentados os valores observados e estimados da relação superfície volume dos grãos de cártamo para diferentes teores de água durante a secagem.

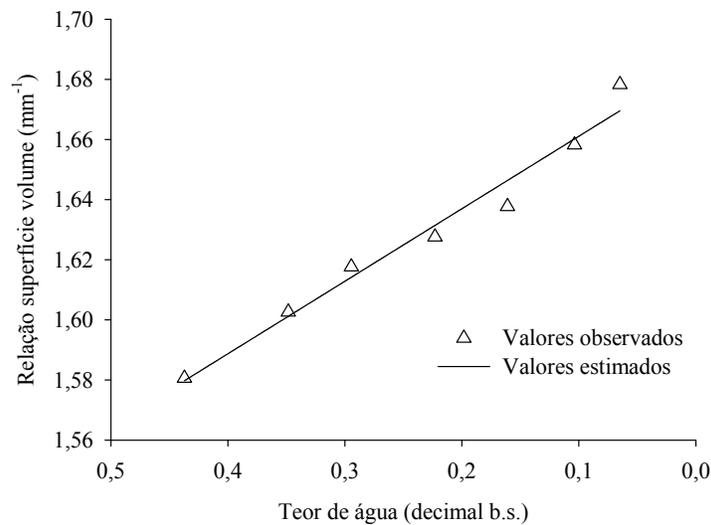


FIGURA 10. Valores observados e estimados da relação superfície volume dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Os valores da relação superfície volume se elevaram conforme reduziu o teor de água dos grãos de cártamo (Figura 10), sendo a interação entre essas variáveis durante o processo de secagem descrito satisfatoriamente por um modelo de regressão linear (Tabela 4). Araujo et al. (2014) e Siqueira et al. (2012c), trabalhando com grãos de amendoim e frutos de pinhão manso, respectivamente, também observaram comportamento semelhante ao do presente trabalho, para a relação superfície volume durante a secagem.

De acordo com Farinha (2008), se apenas fatores físicos estiverem envolvidos no processo, a taxa de redução de água é proporcional a relação superfície volume (superfície específica). Admitindo que a forma do produto seja

constante, a relação superfície volume ou superfície específica do produto aumenta com a redução de seu volume, favorecendo a remoção de água do mesmo.

Na Tabela 4 são apresentadas as regressões lineares ajustadas aos dados experimentais da área projetada, da área superficial, da relação superfície volume e da relação superfície massa, bem como os seus respectivos coeficientes de determinação e o nível de significância de cada modelo de regressão ajustado.

TABELA 4. Equações ajustadas aos valores das propriedades físicas dos grãos de cártamo em função do teor de água.

Variável analisada	Modelo	R ² (decimal)	F	P _{level}
Área projetada (A _p)	$A_p = 5,2063 U + 27,1233$	0,9798	292,66	<0,0001
Área superficial (S) ¹	$S = 16,2471 U + 70,5955$	0,9784	273,16	<0,0001
Área superficial (S) ²	$S = 18,1088 U + 86,6154$	0,9803	300,22	<0,0001
Relação superfície volume (SV)	$SV = -0,2412 U + 1,6852$	0,9660	171,46	<0,0001
Relação superfície massa (S _w)	$S_w = 184,9527 W^{0,2469}$	0,9818	325,48	<0,0001

¹Área superficial calculada pela Equação 10 (Jain & Bal, 1997);

²Área superficial calculada pela Equação 11 (Mohsenin, 1986);

U: teor de água (decimal b.s.); e

W: massa do produto (g).

A relação entre a área superficial e a massa dos grãos de cártamo (S_w), para uma faixa de teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s., em que esta relação foi obtida por meio de regressão não linear (Tabela 4), apresenta coeficiente de determinação de 0,98 e significância do modelo de regressão ao nível de 1% pelo teste F, ou seja, representando de modo satisfatória esta relação.

De acordo com Goneli et al. (2008), com esta relação é possível estimar a área superficial dos grãos, em mm², por meio da massa unitária, em g, servindo como mais uma ferramenta, para engenheiros e projetistas, para fornecer informações a respeito dessas variáveis para o desenvolvimento de equipamentos para a pós-colheita.

3.3.3 Contração da massa e unitária

Na Tabela 5 são apresentados os valores do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os modelos utilizados para avaliar a contração da massa dos grãos de cártamo durante a secagem.

TABELA 5. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica da massa dos grãos de cártamo.

Designação do Modelo	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
Bala e Woods modificado (1984)	0,0109	0,8056	0,9597
Corrêa et al. (2004)	0,0143	1,0188	0,9301
Exponencial	0,0115	0,8959	0,9547
Linear	0,0108	0,8570	0,9603
Polinomial	0,0101	0,7610	0,9652
Rahman	0,0099	0,8056	0,9665

Analisando a Tabela 5, nota-se que todos os modelos de contração volumétrica apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação (R^2), além de valores reduzidos do desvio padrão da estimativa (SE), sendo que quanto menor os valores deste parâmetro estático melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados. Conforme Mohapatra & Rao (2005), modelos que apresentam valores de erro médio relativo (P) inferior a 10% são adequados para representar o processo em questão, sendo assim todos os modelos analisados estão aptos a representar o processo de contração volumétrica da massa dos grãos de cártamo durante a secagem (Tabela 5).

Dentre os seis modelos analisados para representar a contração volumétrica da massa dos grãos de cártamo, durante a secagem, se destacaram os modelos Linear, Polinomial e Rahman, sendo selecionado o modelo Linear devido a sua simplicidade. Resende et al. (2005) e Oliveira et al (2013) também utilizaram o modelo linear para representar índice de contração da massa de grãos de feijão e soja, respectivamente.

A Equação 25 expressa o modelo Linear ajustado para representar a contração da massa (ψ_m , adimensional) dos grãos de cártamo em função do teor de água (U, em decimal b.s.), para uma faixa de teor de água de 0,45 à 0,08 decimal b.s.

$$\psi_m = 0,8257 + 0,3917 U \quad (25)$$

Na Figura 11 são apresentados os valores observados e estimados para a contração volumétrica da massa dos grãos de cártamo pelo modelo Linear durante o processo de secagem.

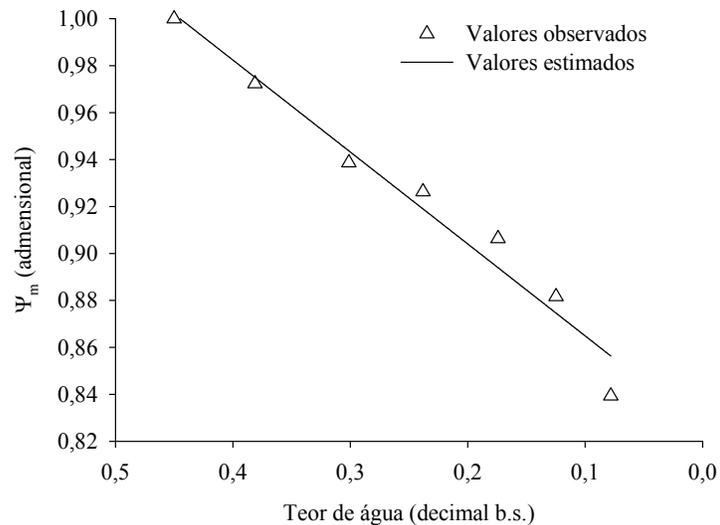


FIGURA 11. Valores observados e estimados para a contração volumétrica da massa dos grãos de cártamo durante a secagem.

Como pode ser observado na Figura 11 a massa dos grãos de cártamo contraíram em torno de 16%, com relação ao seu volume inicial, para uma redução do teor de água de 0,45 à 0,08 decimal b.s..

Na Tabela 6 são apresentados os valores do desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e coeficiente de determinação (R^2) para os modelos utilizados para avaliar a contração unitária dos grãos de cártamo durante a secagem.

TABELA 6. Parâmetros estatísticos para os modelos de contração volumétrica unitária dos grãos de cártamo.

Designação do Modelo	SE (decimal)	P (%)	R^2 (decimal)
Bala e Woods modificado (1984)	0,0066	0,5080	0,9776
Corrêa et al. (2004)	0,0085	0,5771	0,9628
Exponencial	0,0068	0,5115	0,9762
Linear	0,0065	0,5127	0,9781
Polinomial	0,0071	0,5131	0,9743
Rahman	0,0060	0,5080	0,9813

Observando a Tabela 6 nota-se que todos os modelos apresentaram valores reduzidos do desvio padrão da estimativa (SE), valores do erro médio relativo (P) inferior a 10%, enfatizando que os modelos são aptos a representarem o processo em estudo, e ainda todos os modelos apresentam elevados valores do coeficiente de determinação (R^2).

Com base nos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 6, pode-se afirmar que todos os modelos são adequados para estimar a contração volumétrica unitária dos grãos de cártamo, porém entre os seis modelos analisados destacam-se Bala e Woods modificado (1984), Linear e Rahman, sendo entre os três, selecionado o modelo Linear, devido a sua simplicidade, para representar a contração unitária dos grãos de cártamo durante o processo de secagem. Afonso Júnior e Corrêa (2000) também utilizaram o modelo Linear para estimar os valores do índice de contração volumétrica unitária para duas variedades de milho pipoca.

A Equação 26 expressa o modelo Linear ajustado para representar a contração unitária (ψ_u , adimensional) dos grãos de cártamo em função do teor de água (U, em decimal b.s.), para uma faixa de teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s..

$$\psi_u = 0,8566 + 0,3243 U \quad (26)$$

Na Figura 12 são apresentados os valores observados e estimados para a contração volumétrica unitária dos grãos de cártamo pelo modelo Linear durante o processo de secagem.

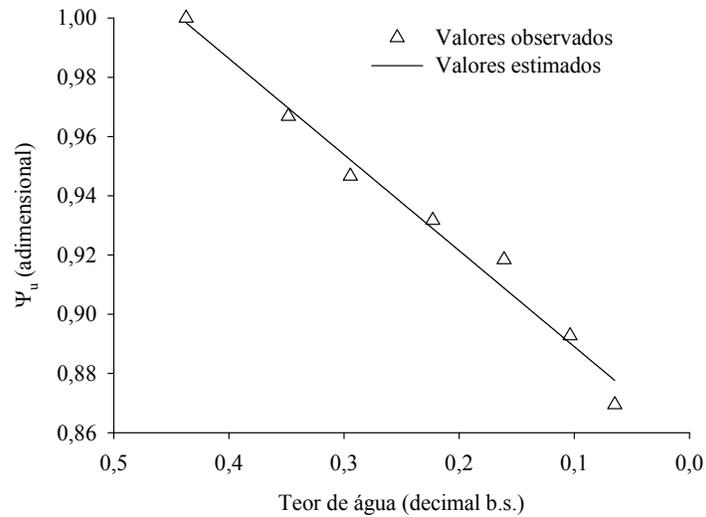


FIGURA 12. Valores observados e estimados para a contração volumétrica unitária dos grãos de cártamo durante a secagem.

Os grãos de cártamo contraíram aproximadamente 13%, com relação ao seu volume inicial, em função da redução do teor de água de 0,44 à 0,06 decimal b.s. (Figura 12). A contração unitária foi ligeiramente inferior a contração da massa dos grãos de cártamo, esse fato pode ser explicado devido ao fato do conjunto de grãos irem se “acomodando”, na massa, de maneira a deixar menos espaços vazios entre os grãos, ao passo que esses reduzem seus volumes durante a secagem. Essa hipótese pode ser reforçada pelo comportamento da porosidade da massa de grãos de cártamo, a qual diminui, durante o processo de secagem (Figura 6).

3.4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

1 - a massa específica aparente, massa específica unitária, massa de mil grãos e porosidade reduzem com o processo de secagem;

2 - a remoção de água durante a secagem causa a redução das dimensões características do produto (comprimento, largura e espessura), sendo a dimensão que menos contrai o comprimento, além da redução do diâmetro geométrico médio, volume do grão, circularidade e esfericidade;

3 - com a redução do teor de água reduz a área projetada, área superficial e aumenta a relação superfície volume;

4 - a equação utilizada para representar a relação área superficial e massa pode ser utilizada para os grãos de cártamo de maneira satisfatória;

5 - a redução do teor de água influencia a contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo, provocando redução em seus valores de aproximadamente 16 e 13%, respectivamente; e

6 - a contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo podem ser representadas satisfatoriamente por um modelo de regressão linear.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Cinética da contração volumétrica dos grãos de duas cultivares de milho-pipoca durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, n. 1, p. 61-65, 2000.

ARAUJO, W.D.; GONELI, A.L.D.; SOUZA, C.M.A.; GONÇALVES, A.A.; VILHASANTI, H.C.B. Propriedades físicas dos grãos de amendoim durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.279-286, 2014.

BANDE, Y.M.; ADAM, N.M.; AZMI, Y.; JAMAREI, O. Moisture-dependent Physical and Compression Properties 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.

COŞGE, B.; GÜRBÜZ, B.; KIRALAN, M. Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter. **International Journal of Natural and Engineering Sciences**, v.1, n.3, p.11-15, 2007.

DURŞUN, I.; TUĞRUL, K.M., DURŞUN, E. Some physical properties of sugarbeet seed. **Journal of Stored Products Research**, v.43, n.2, p.149-155, 2007.

EKIN, Z. Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Utilization: A Global View. **Journal of Agronomy**, v.4, n.2, p.83-87, 2005.

EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the Underutilized and Neglected Crop: A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v.9, n.6, p.299-306, 2010.

FARINHA, L.R.L. **Características físicas na perda da matéria fresca e evolução das propriedades reológicas e cor da cenoura cv. Brasília no armazenamento**. 2008. 111f Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 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, n.2, 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, n.1, p.1-8, 2011.

GUEDES, M.A.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M.; FARIAS, P.A. Caracterização física de grãos de soja utilizando-se processamento digital de imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.3, p.279-294, 2011.

ISIK, E.; IZLI N. Physical Properties of Sunflower Seeds (*Helianthus annuus* L.). **International Journal of Agricultural Research**, v.2, n.8, p.677-686, 2007.

JAIN, R.K.; BAL, S. Properties of pearl millet. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.66, n.2, p.85-91, 1997.

JESUS; F.F.; SOUZA, R.T.G.; TEIXEIRA, G.C.S.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A. Propriedades físicas de sementes de feijão em função de teores de água. **Engenharia na agricultura**, v.21, n.1, p.9-18, 2013.

KIBAR, H.; ÖZTÜRK, T.; ESEN, B. The effect of moisture content on physical and mechanical properties of rice (*Oryza sativa* L.). **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.8, n.3, p.741-749, 2010.

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.

MILANI, E.; SEYED, M.; RAZAVI, A.; KOOCHEKI, A.; NIKZADEH, V.; VAHEDI, N.; MOEINFARD, M.; GHOLAMHOSSEINPOUR, A. Moisture dependent physical properties of cucurbit seeds. **International Agrophysics**, v.21, n.2, p.157-168, 2007.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, n.4, p.513-518, 2005.

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

OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T.A.S.; SIQUEIRA, V.C. JOSÉ NETO, C.A. Alterações morfométricas em grãos de soja durante o processo de secagem. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.3, p.975-984, 2013.

PADILHA, A.C.M.; GOLLO, S.S.; SILVA, M.N. **Estudos na Cadeia Produtiva do Biodiesel**. Jaguarão/RS: Unipampa, 2012. 255p.

RAZAVI, S.M.A.; RAFE, A.; MOGHADDAM, T.M.; AMINI, A.M. Physical properties of pistachio nut and its kernel as a function of moisture content and variety. Part II. Gravimetric properties. **Journal of Food Engineering**, v.81, n.1, p.218-225, 2007.

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.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; RIBEIRO, D.M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.1, p.225-230, 2008.

SEIFI, M.R.; ALIMARDANI, R. Moisture-Dependent Physical Properties of Sunflower Seed (SHF8190). **Modern Applied Science**, v.4, n.7; p.135-143, 2010a.

- SEIFI, M.R.; ALIMARDANI, R. Comparison of moisture-dependent physical and mechanical properties of two varieties of corn (Sc 704 and Dc 370). **Australian Journal of Agricultural Engineering**, v.1, n.5, p.170-178, 2010b.
- SEIFI, M.R.; ALIMARDANI, R.; AKRAM, A.; ASAKEREH, A. Moisture-Depend Physical Properties of Safflower (Goldasht). **Advance Journal of Food Science and Technology**, v.2, n.6, p.340-345, 2010.
- SHARMA, V.; DAS, L.; PRADHAN, R.C.; NAIK, S.N.; BHATNAGAR, N.; KUREEL, R.S. Physical properties of tung seed: An industrial oil yielding crop. **Industrial Crops and Products**, v.33, n.2, p.440-444, 2011.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Determination of the volumetric shrinkage in jatropha seeds during drying. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.34, n.3, p.231-238, 2012a.
- SIQUEIRA, V.C.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H. Propriedades físicas das sementes de pinhão-mansão ao longo da secagem em diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias**, v.33, n.1, p.2705-2714, 2012b.
- 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, 2012c.
- SIRISOMBOON, P.; KITCHAIYA, P.; PHOLPHO, T.; MAHUTTANYAVANITCH, W. Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels. **Biosystems Engineering**, v.97, n.2, p.201-207, 2007.
- TARIGHI, J.; MAHMOUDI, A.; RAD, M.K. Moisture-dependent engineering properties of sunflower (Var. *Armaviriski*). **Australian Journal of Agricultural Engineering**, v.2, n.2, p.40-44, 2011a.
- TARIGHI, J.; MAHMOUDI, A.; RAD, M.K. Moisture-Depend some Postharvest Properties of Two Varieties of Safflower (*Darab* and *Goldasht*). **Modern Applied Science**, v.5, n.1; p.139-148, 2011b.
- TAVAKOLI, M.; TAVAKOLI, H.; RAJABIPOUR, A.; AHMADI, H.; GHARIB-ZAHEDI, S.M.T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.2, n.4, p.84-91, 2009.
- ZEWDU, A.D.; SOLOMON, W.K. Moisture-Dependent Physical Properties of Tef Seed. **Biosystems Engineering**, v.96, n.1, p.57-63, 2007.

CONCLUSÕES GERAIS

O secador experimental construído funcionou de modo satisfatório para o desenvolvimento de pesquisas de secagem em camada delgada e espessa, permitindo o controle sobre a temperatura e velocidade do ar para a secagem de produtos agrícolas. Havendo ainda a possibilidade de usar o mesmo para ensaios de aeração de grãos.

Para representar as curvas de secagem em camada delgada dos grãos de cártamo, dentre os modelos que apresentaram ajuste satisfatório, foi escolhido o tradicional modelo de Page. Para o processo de secagem em estudo o coeficiente de difusão efetivo teve seus valores elevados com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem, enquanto, a energia de ativação teve suas magnitudes reduzidas, para a faixa de temperatura de 40 à 80 °C, conforme aumentou-se a velocidade do ar.

Todas as propriedades físicas dos grãos de cártamo foram influenciadas pela redução do teor de água. Com exceção da relação superfície volume todas as outras propriedades físicas reduziram suas magnitudes com a redução do teor de água. A contração volumétrica da massa e unitária dos grãos de cártamo foi de aproximadamente 16 e 13%, respectivamente, com a redução do teor de água.