

Rocha, AA, Stoppe, ACR, Silvério, BC, Santos, KC & Vieira Neto, JL (2020). Drying of malt residues in a solar greenhouse and in a fixed bed solar dryer. *Research, Society and Development*, 9(7):1-27, e447974335.

Secagem de resíduos de malte em uma estufa solar e em um secador solar de leito fixo

Drying of malt residues in a solar greenhouse and in a fixed bed solar dryer

Secado de residuos de malta en un invernadero solar y en un secador solar de lecho fijo

Recebido: 08/05/2020 | Revisado: 10/05/2020 | Aceito: 12/05/2020 | Publicado: 21/05/2020

Amanda Alves Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0158-9852>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: amandaalvesrocha@hotmail.com

Ana Carolina Ribeiro Stoppe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4744-0738>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: anacarolina_stoppe@hotmail.com

Beatriz Cristina Silvério

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0887-3474>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: beatriz.silverio@uftm.edu.br

Kássia Graciele dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7452-6900>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: kassia.santos@uftm.edu.br

José Luiz Vieira Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0736-3974>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: jose.neto@uftm.edu.br

Resumo

As indústrias cervejeiras geram grande quantidade de resíduos de malte (RM), que podem ser empregados como ração animal. No entanto, a alta umidade do resíduo pode implicar em perdas do material devido à mofo ou fermentação. Nesse contexto, a secagem solar pode ser

uma operação vantajosa, pois irá facilitar o armazenamento e transporte, conservando também a qualidade nutricional do resíduo. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a secagem do RM empregando dois equipamentos: estufa solar e secador solar de leito fixo. Inicialmente, foi realizado um estudo da cinética de secagem do material em diferentes temperaturas, obtendo-se o modelo de Page como o que melhor representa a cinética de secagem do RM. Nos testes de secagem solar, foi possível determinar a influência de fatores como a radiação solar e velocidade do vento sobre as temperaturas obtidas, bem como sobre a taxa de secagem em ambos os equipamentos. Análises de fluidodinâmica computacional do secador de leito fixo mostraram a melhor forma de alimentação do ar dentro do secador, que favorece a secagem. No entanto, a estufa solar se mostrou mais eficiente, promovendo uma secagem mais homogênea do material.

Palavras-chave: Secador solar; Sustentabilidade; Fluidodinâmica computacional.

Abstract

The brewing industries generate large amounts of barley residues (RM), which can be used as animal feed. However, the high moisture of RM can lead to losses due to mold or fermentation. In this context, solar drying can be an advantageous operation, as it will favor storage and transportation, while it keeps the waste nutritional quality. Thus, the aim of this work was to study the drying of RM using two equipments: a solar greenhouse and a fixed bed solar dryer. Initially, a study of the drying kinetics was performed at different temperatures, obtaining the Page model as the one that best represents the RM drying kinetics. In the solar drying tests, it was possible to determine the influence of factors such as solar radiation and wind speed on the temperatures obtained, as well as on the drying rate in both equipments. Computational fluid dynamics analysis of the fixed bed dryer showed the best way to feed air into the dryer, which favors drying. However, the solar greenhouse proved to be more efficient, promoting a more homogeneous drying of the material.

Keywords: Solar dryer; Sustainability, Computational fluid dynamics.

Resumen

Las industrias cerveceras generan grandes cantidades de residuos de malta (RM), que pueden usarse como alimento para animales. Sin embargo, la alta humedad del residuo puede provocar pérdidas de material debido al moho o la fermentación. En este contexto, el secado solar puede ser una operación ventajosa, ya que facilitará el almacenamiento y el transporte,

al tiempo que conservará la calidad nutricional de los desechos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar el secado de RM utilizando dos equipos: invernadero solar y secador solar de lecho fijo. Inicialmente, se realizó un estudio de la cinética de secado del material a diferentes temperaturas, obteniendo el modelo de Page como el que mejor representa la cinética de secado del RM. En las pruebas de secado solar, fue posible determinar la influencia de factores como la radiación solar y la velocidad del viento en las temperaturas obtenidas, así como en la velocidad de secado en ambos equipos. El análisis de dinámica de fluidos computacional del secador de lecho fijo mostró la mejor manera de alimentar aire al secador, lo que favorece el secado. Sin embargo, el invernadero solar demostró ser más eficiente, promoviendo un secado más homogéneo del material.

Palabras clave: Secador solar; Sostenibilidad; Dinámica de fluidos computacional.

1. Introdução

A cevada é um cereal utilizado principalmente pelas indústrias cervejeiras, na fabricação de malte e ocupa a quinta posição de importância econômica no mundo (Silvério et al., 2017). Uma aplicação do resíduo de cevada, que vem sendo cada vez mais explorada, é como suplemento alimentar de bovinos, uma vez que estes resíduos possuem alto valor proteico.

Na região do Triângulo Mineiro, os pecuaristas estão substituindo parte da ração de alimentação do gado de leite por resíduos de malte, uma vez que estes possuem alto valor energético e proteico. Esta mudança na dieta dos animais aumentou a produção de leite a um menor custo para os produtores. Mas como é um material úmido, ele deve passar por um processo de secagem para preservar suas propriedades e qualidade (Canal Rural, 2014).

A secagem é um processo que tem como finalidade reduzir o teor de umidade de um material, por meio de fenômenos de transferência de calor e massa. É um processo importante e muito utilizado, principalmente nas indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, dentre outras; pois aumenta a vida útil do produto, impede o desenvolvimento de micro-organismos e facilita o transporte e armazenamento (Celestino, 2010). Além disto, a secagem também ajuda a preservar a aparência e a qualidade nutritiva de alimentos (Silva, 2008).

A secagem de um sólido úmido ocorre através de transferência de calor e massa. A transferência de calor, responsável por causar a evaporação da água, depende de fatores como a temperatura, umidade relativa do ar e superfície de contato do material com o ar. A

transferência de massa ocorre do interior para a superfície do sólido e depois arrasta o vapor formado e depende das características físicas e da umidade inicial material, e da temperatura de operação. A secagem ocorre quando a pressão de vapor do líquido presente no sólido é superior à pressão parcial do vapor do líquido na fase gasosa (Evangelista Neto, 2013).

Os processos de secagem consomem grande quantidade de energia, por isso, a procura por novos métodos e novas fontes de energias renováveis, como a energia solar (Nascimento, 2014). Na literatura são encontradas várias aplicações da energia solar em operações da indústria, tais como aquecimento de água (Fonseca et al., 2017; Silva & Sousa, 2020); tratamento de efluentes (Terra et al., 2020), processos de destilação da água (Araújo & Vasconcelos, 2019; Tavares & Sousa, 2019), destilação solar de álcool (Silva et al., 2019), extração de óleos vegetais (Tavares et al., 2019), em sistemas de refrigeração por absorção e aquecimento solar (Paiva & Souza, 2015) e também na secagem solar (Bontempo et al., 2020; Guimarães et al., 2020; Stoppe et al., 2020), dentre outras operações.

O uso da energia solar para realizar a secagem é um processo simples, econômico e viável, uma vez que o uso de fontes renováveis é cada vez mais interessante e necessário. A secagem solar pode ocorrer de forma direta, por meio da exposição do material ao sol ou indireta, quando a energia solar é utilizada para o aquecimento do fluido de secagem.

Os equipamentos solares podem e devem ser bastante explorados nos países tropicais, como o Brasil, por possuírem grande potencial solar durante quase todo o ano; em várias regiões. Secadores solares, por trabalharem a temperaturas baixas, se comparado aos secadores artificiais, evitam a quebra da camada protetora do material, o que ajuda a conservar suas características físicas e químicas. Esse tipo de secador possui vantagens como facilidade na operação e manutenção e baixo custo de implementação (Nordeste Rural, 2017).

No secador solar de leito fixo, o ar quente de secagem percorre o leito onde está o empacotado o material, transferindo calor e retirando umidade do mesmo. A velocidade superficial do ar depende da área da seção transversal da coluna (Cremasco, 2012).

A estufa solar é um método de secagem à baixa temperatura, baixo custo e de fácil manutenção. É um processo intermediário entre a secagem ao ar livre, onde os fatores de secagem não são controlados e a secagem na estufa convencional, com aquecimento artificial (Santini, 1983). Ela é constituída de uma estrutura de madeira ou chapa metálica com cobertura e paredes de material translúcido que permite a passagem da luz solar. A estrutura onde o material é depositado é geralmente pintada de preto, para auxiliar na absorção da radiação solar. A secagem em uma estufa solar é sempre mais rápida que uma secagem ao ar

livre (Stangerlin et al., 2009). Nos secadores com cobertura, a radiação solar que incide sobre a cobertura é absorvida ocasionando um aumento da temperatura e da energia térmica no interior da câmara de secagem. Com isso, a radiação com grande comprimento de onda e baixa frequência, fica retida, gerando um “efeito estufa” (Silva, 2012).

A técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) permite ao usuário prever o escoamento de fluidos, transferências de massa, calor e momento com o intuito de sugerir melhorias em equipamentos.

O estudo da fluidodinâmica utilizando a técnica CFD vem sendo aplicado para avaliar o comportamento e eficiência do fluxo de ar dentro de leitos fixos (Stoppe et al., 2020), sendo possível se descrever a distribuição de velocidade, pressão e temperatura do fluido desde o início do movimento até a estabilização do sistema. O emprego desta técnica viabiliza a otimização das condições gerais de operação de um secador de leito fixo, sem a necessidade de se realizar um grande volume de testes experimentais.

As cervejarias da região do Triângulo Mineiro produzem grande quantidade de Resíduo de Malte (RM), desta forma, este trabalho teve como objetivo estudar a secagem do RM em diferentes equipamentos. Para tal, estudou-se a cinética de secagem do resíduo empregando um analisador de umidade e determinou-se o melhor modelo cinético de secagem. Também se realizou a secagem do RM empregando um secador solar de leito fixo e uma estufa solar. Análises de fluidodinâmica computacional (CFD) auxiliaram a avaliar a relação da velocidade do ar no equipamento e as taxas de secagem encontradas no secador de leito fixo, visando encontrar a melhor forma de alimentar o ar dentro do secador e assim favorecer a secagem.

2. Metodologia

As pesquisas são realizadas para trazer: novos saberes para a sociedade e elas precisam de metodologias para ser validadas pela comunidade científico-acadêmica como preconiza Pereira, Shitsuka, Parreira & Shitsuka (2018). Pesquisa quantitativa faz uso de valores numéricos, porcentagens, fórmulas matemáticas ou estatísticas. Um método de pesquisa quantitativa e laboratorial foi utilizado no presente estudo, conforme descrito a seguir, para a caracterização das partículas, cinética de secagem no analisador de umidade infravermelho, simulação via Fluidodinâmica Computacional e os estudos de secagem no secador de leito fixo e na estufa solar.

2.1. Caracterização das partículas

Por meio da picnometria, determinou-se a densidade aparente do material. O líquido utilizado no teste foi querosene (Santos et al., 2013). Os Resíduos de Malte (RM) foram submersos em água, em um béquer, e aquecido a 100°C durante 15 minutos. Posteriormente, o excesso de água foi retirado e o material foi levado para a estufa a 105°C durante aproximadamente 45 minutos, tempo suficiente para secar a superfície dos RM. Considerando a densidade do querosene 0,82 g/cm³, calculou-se a densidade aparente do resíduo.

Para obter os fatores de forma das partículas como circularidade, alongamento e esfericidade, fez-se uma análise morfológica das partículas a partir de sua imagem, pelo software *ImageJ*. O alongamento (*Al*) foi encontrado pela Equação 1 e a esfericidade (ϕ) pela Equação 2 (Cremasco, 2012).

$$Al = \frac{b}{a} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{A_p 4\pi}{P^2} \quad (2)$$

em que *a* é a menor dimensão da partícula, *b* é a maior, *A_p* é a área projetada e *P* o perímetro.

A porosidade é a fração de espaços vazios, ou seja, a relação entre o volume de espaços vazios no empacotamento do material e o volume total ocupado pelo mesmo. Para determinar a porosidade e a densidade bulk foram adicionadas partículas a um recipiente de volume conhecido, e determinada a massa de partículas. O procedimento foi realizado em triplicata. A porosidade (ε) foi encontrada por meio da Equação 3, enquanto a densidade bulk (ρ_{bulk}) foi obtida pela Equação 4, em que *m* é a massa de partículas, ρ_p é a densidade aparente do material e *V_t* é o volume do recipiente.

$$\varepsilon = 1 - \frac{m/\rho_p}{V_{total}} \quad (3)$$

$$\rho_{bulk} = \frac{m}{V_{total}} \quad (4)$$

A distribuição granulométrica (DG) foi obtida por peneiramento. Foram ajustados os modelos de DG mais empregados na literatura: GGS, RRB e Sigmóide. O diâmetro médio de Sauter foi calculado, de acordo com Cremasco (2012).

2.2. Cinética de secagem no analisador de umidade infravermelho

Os testes de cinética de secagem foram realizados empregando um analisador de umidade infravermelho, no qual foram inseridas as amostras. O equipamento fornece a porcentagem de umidade do material que é perdida em função do tempo. A partir destes dados, calculou-se a umidade em base seca (X_{bs}), a razão de umidade (RU) e taxa de secagem (N); representados pelas Equações 6 a 8, respectivamente (Venturin & Silva, 2019).

$$X_{bsi} = \frac{ma}{ms} \quad (6)$$

$$RU = \frac{(X_{bsi} - X_e)}{(X_{bs_0} - X_e)} \quad (7)$$

$$N = \frac{\Delta RU}{\Delta t} \quad (8)$$

sendo ma a massa de água, ms a massa seca do material, X_{bsi} a umidade em base seca no instante i , X_{bs_0} a umidade inicial e X_e a umidade de equilíbrio dinâmica.

Foram realizados testes nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C. Foram ajustados os principais modelos cinéticos de secagem disponíveis na literatura. Os modelos investigados estão descritos pelas equações 9 a 20 na Tabela 1 (Resende et al., 2010; Souza, 2013).

Tabela 1 – Modelos cinéticos de secagem segundo a literatura.

Modelo	Equação (sendo $k = a \cdot \exp(-b/T_f)$)	
Modelo Wang e Singh	$RU = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$	(9)
Modelo Verna	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot t)^2$	(10)
Modelo Thompson	$RU = \exp\left(\frac{(-a - (a^2 + 4bt)^{0,5})}{2b}\right)$	(11)
Modelo Page	$RU = \exp[-k \cdot t^n]$	(12)
Modelo Newton	$RU = \exp[-k \cdot t]$	(13)
Modelo Midilli	$RU = c \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b_1 \cdot t$	(14)
Modelo Logarítmico	$RU = c \cdot \exp(-k \cdot t) + d$	(15)
Modelo Henderson e Pabis	$RU = a \cdot \exp[-(k \cdot t)]$	(16)
Modelo Henderson e Pabis modificado	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(17)
Modelo Exponencial de Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot t)$	(18)
Modelo Dois Termos	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(19)
Modelo Aproximação da Difusão	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(20)

Fonte: Adaptado de Resende et al. (2010) e de Souza (2013).

A partir da determinação do melhor modelo cinético e do parâmetro k , é possível chegar a uma equação para a difusividade mássica efetiva, em função da temperatura; de acordo com a Equação 21.

$$Def(T) = \left(\frac{Lo}{\pi}\right)^2 \cdot k(T) \quad (21)$$

sendo Lo a metade da espessura do sólido.

2.3. Fluidodinâmica computacional

A aplicação deste tipo de simulação computacional tem início com a criação de malhas, que são construídas a partir de desenhos da geometria do equipamento em um número de células discretizadas.

Durante a execução desta etapa foi utilizado o software Gambit®, que gerou uma malha computacional tridimensional, contendo cerca de 249850 elementos, hexaédricos ao longo do leito e tetraédricos nas proximidades do exaustor.

Este software disponibiliza uma interface com o ANSYS Fluent®, que é o programa usado neste estudo, o qual é capaz de simular diversas condições de modelagem física

(transferências de calor, turbulência, fluxo e reações químicas) as quais geram resultados concisos e com rapidez (Santos et al., 2015).

A simulação se baseou na resolução das equações de transferência de quantidade de momento e da continuidade para fase fluida, aplicando o método de volumes finitos, sendo considerado que o fluido permeava um meio poroso.

O conjunto de equações de conservação de massa (Equação 22) e momento (Equação 23) da fase gasosa, bem como equações constitutivas aplicadas foram resolvidas empregando o método de volumes finitos.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{v}) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\varepsilon\rho\vec{v}\vec{v}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\vec{\tau}) + \varepsilon\vec{B}f - \left(\frac{\varepsilon^2\mu}{K}\vec{v} + \frac{\varepsilon^3C_2}{2}\rho|\vec{v}|\vec{v} \right) \quad (23)$$

O meio poroso homogêneo foi modelado pela adição de um termo fonte (S_i), nas equações de continuidade e momento, como mostrado pela Equação 24:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v_j + C_2\frac{1}{2}\rho|v|v_j \right) \quad (24)$$

A equação de Ergun foi aplicada para fluxo turbulento do gás. O leito fixo foi modelado usando a permeabilidade e o coeficiente de perda inercial. Assim, a queda de pressão no meio poroso é descrita pela Equação 25.

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{D_p^2\varepsilon^3}v + \frac{1,75\rho(1-\varepsilon)}{D_p\varepsilon^3}v^2 \quad (25)$$

Para isso é preciso caracterizar o meio poroso, através do cálculo da resistência viscosa (Rv) e inercial (Iv) do leito, através das Equações 26 e 27, que derivam da equação de Ergun.

$$Rv = \frac{150(1-\varepsilon)^2}{\phi^2D_p^2\varepsilon^3} \quad (26)$$

$$Iv = \frac{3,5(1-\varepsilon)}{\phi D_p \varepsilon^3} \quad (27)$$

em que ε é a porosidade do leito; D_p é o diâmetro médio da partícula em metros e ϕ é a esfericidade da partícula.

Como se teve o interesse de analisar o perfil de velocidade do ar no leito, as condições de contorno e modelos matemáticos adotados estão na Tabela 2:

Tabela 2 – Modelos matemáticos e condições de contorno empregados na análise fluidodinâmica para o perfil de velocidade do ar no leito.

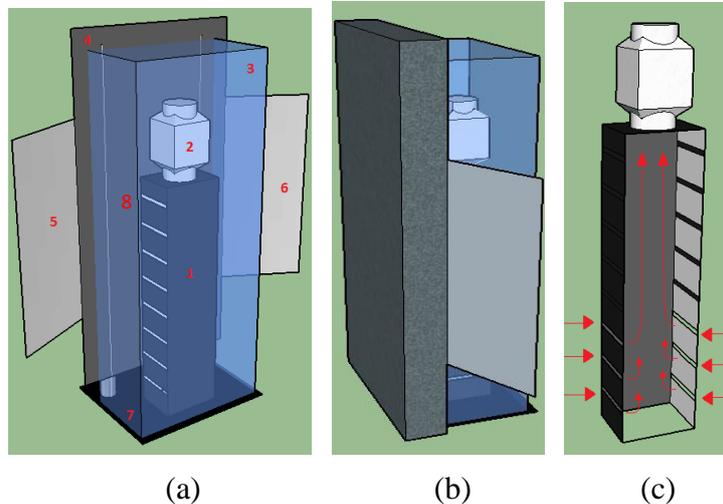
<ul style="list-style-type: none">• Condições de contorno:
<ul style="list-style-type: none">- Saída do leito: velocidade do ar (2 m/s)- Entradas nas aletas: Pressão prescrita- Temperatura de operação: 318 K- Parede: Velocidade igual a zero (no lip)
<ul style="list-style-type: none">• Método de solução:
<ul style="list-style-type: none">- Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE- Discretização espacial (Gradient): Least Squares Cell based- Discretização espacial (Pressure): Standart- Discretização espacial (Momentum): Second Order Upwind- Discretização espacial (Turbulent Kenetic Energy): 1° Order Upwind- Discretização espacial (Turbulent Dissipation Rate): 1° Order Upwind
<ul style="list-style-type: none">• Critério de convergência:
<ul style="list-style-type: none">- Equação da continuidade e do Movimento: 1.10^{-4}
<ul style="list-style-type: none">• Modelo de Turbulência da fase fluida:
<ul style="list-style-type: none">- K-epsilon (2 eqn) padrão

Fonte: Autores (2020).

2.4. Secagem no secador solar de leito fixo

A Figura 1 mostra o secador solar de leito fixo com convecção forçada.

Figura 1 – Secador solar de leito fixo: (a) 1: leito fixo metálico; 2: exaustor; 3: cobertura transparente; 4: fundo metálico com radiador preto acoplado; 5 e 6: refletores; 7: base do leito; (b) detalhe do isolante de 7,5 cm (8); (c) esquema de alimentação de ar no leito.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 1 observa-se o equipamento, constituído por: 1) leito vertical (0,6 m) com oito entradas laterais de ar; 2) exaustor (12v), que promove a convecção forçada; 3) a caixa de vidro, que promove o efeito estufa; 4) a placa metálica posterior e radiador, responsável por coletar calor; 5) e 6) os refletores; 7) base do equipamento; 8) isolamento de isopor com espessura de 0,075 m. Este equipamento é o mesmo utilizado por Stoppe et al. (2020), na secagem de folhas de moringa e de sementes de soja.

Utilizou-se a configuração parcialmente fechada do leito (Figura 1-c), ou seja, as cinco entradas superiores foram mantidas fechadas, uma vez que esta configuração se mostrou mais eficiente em testes anteriores (Stoppe et al., 2020). Foram realizados três testes de secagem no leito fixo, com mesma massa de partículas, a fim de verificar o efeito das condições climáticas sobre a operação do equipamento.

Os testes foram realizados em dias ensolarados, no período entre 10 e 17h. O leito foi preenchido com cerca de: 4,2 Kg de resíduo de cevada até a altura de 0,56m. Durante o experimento, foram coletadas medidas de temperatura nos seguintes pontos do equipamento: interior do leito no topo e base; parede externa do leito; das partículas nas alturas 0,06 m; 0,2 m; 0,34 m e 0,48 m do leito fixo; do vidro; do ar no interior da câmara e da temperatura ambiente. A temperatura foi medida a cada 30 minutos.

Amostras do resíduo de cevada em diferentes alturas do leito foram coletadas de hora em hora na parte lateral do mesmo, pesadas e levadas à estufa, a fim obter o perfil axial de

secagem no leito, em diferentes tempos de secagem. Os dados referentes à radiação solar e velocidade do vento foram obtidos pelo portal Inmet.

2.5. Secagem na estufa solar

A Figura 2 mostra a estufa solar empregada neste trabalho.

Figura 2 – Estufa Solar utilizada na secagem.



Fonte: Autores (2020).

Observa-se na Figura 2, que a unidade experimental consiste em uma base de isopor, uma cobertura de vidro e em uma bacia de alumínio de dimensão 45x45x7 cm, na qual o bagaço de malte foi colocado. A bacia foi pintada com tinta de cor preta fosca, a fim de uma melhor absorção da radiação solar. A cobertura foi construída em vidro liso (transparente), com 50x50x12 cm, com uma angulação de 34°, escolhida devido à latitude da cidade de Uberaba-MG, que é de 19°.

Os testes ocorreram em dias ensolarados, com duração de 6 horas. Foram realizados testes com massas iniciais de sólidos de 0,606 kg; 0,858 kg; 1,3 kg e 4,03 kg de resíduo de malte. O experimento com 0,606 kg teve 5,5 horas de duração, o de 1,3Kg teve 7,5 horas de duração e os demais tiveram duração de 6 horas.

Mediu-se a temperatura em diferentes pontos: bacia, vidro externo, partícula e ar no interior da estufa. Durante a primeira hora, mediu-se a temperatura dos pontos citados e coletou-se uma amostra do resíduo de cevada a cada 15 min; no restante do experimento, as coletas foram realizadas em intervalos de 30 min. A cada 30 min, o vidro interno era secado

com o auxílio de um pano para retirar a umidade. Os dados de radiação solar e velocidade do vento foram retirados do portal Inmet.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização da partícula

Por meio da análise de imagem foi possível determinar alongamento, circularidade e esfericidade, cujos valores estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados da caracterização da partícula.

Esfericidade	0,45
Alongamento	2,20
Circularidade	0,44
Densidade Bulk [g/cm ³]	0,40
Densidade aparente [g/cm ³]	1,14
Diâmetro de Sauter [mm]	2,14
Porosidade	0,547

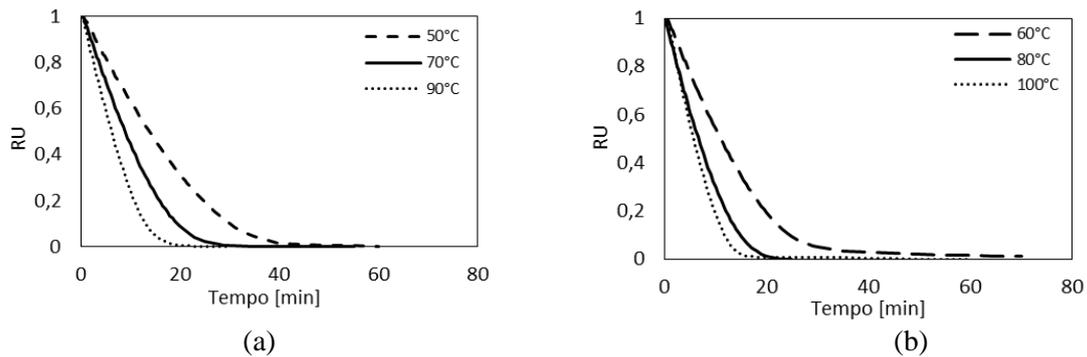
Fonte: Autores (2020).

De acordo com a Tabela 3, o valor do alongamento foi maior que 1, o que caracteriza uma partícula alongada, com esfericidade de cerca de 0,45. Pelo teste de empacotamento, determinou-se a densidade bulk de 0,40 g/cm³ e uma porosidade de 0,547. E pela picnometria, encontrou-se a densidade aparente de 1,14 g/cm³. Através do peneiramento, calculou-se o diâmetro de Sauter com 2,14 mm. O modelo de distribuição granulométrica que melhor representou o tamanho das partículas foi o GGS ($R^2 = 0,996$), em que $X = (D_p/4,846)^{1,926}$.

3.2. Cinética de secagem no infravermelho

A Figura 3 mostra a razão de umidade em função do tempo, nas temperaturas estudadas.

Figura 3 – Curvas de secagem para: (a) 50°, 70°C e 90°C; (b) 60°, 80°C e 100°C.

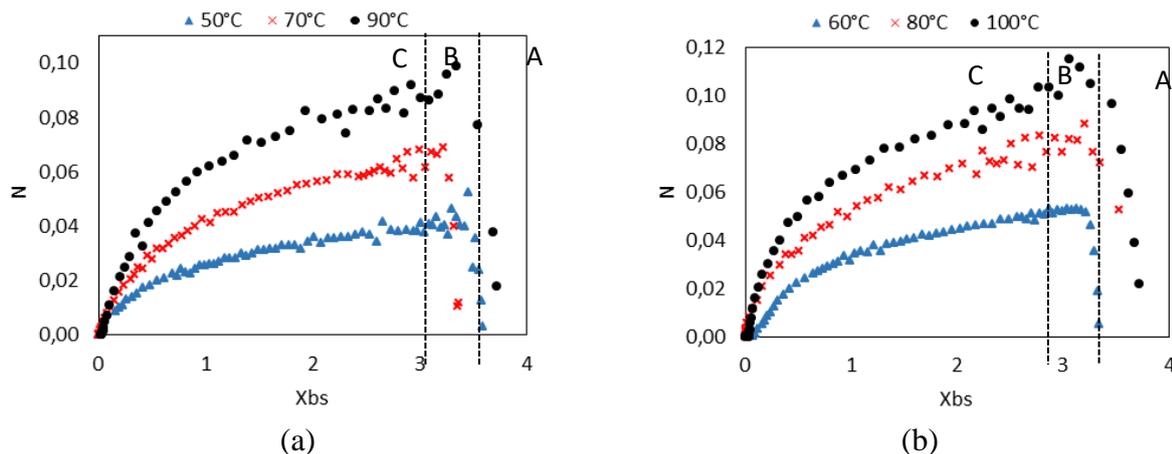


Fonte: Autores (2020).

É possível observar na Figura 3 os resultados de razão de umidade (RU) dos resíduos de malte submetidos ao processo de secagem em um analisador de umidade infravermelho nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Verificou-se que quanto maior a temperatura de operação, menor o tempo de secagem. Tem-se que a 100°C, maior temperatura, a secagem ocorreu em menos de 20 minutos, enquanto que a 50°C a secagem teve duração de cerca de 40 minutos.

A Figura 4 mostra a taxa de secagem em função da umidade em base seca do material. É visualizar três fases da secagem: aquecimento do material em (A), fase de taxa de secagem constante em (B) e taxa decrescente de secagem em (C).

Figura 4 – Taxa de secagem do resíduo de malte: (a) 50°, 70°C e 90°C; (b) 60°, 80°C e 100°C.



Fonte: Autores (2020).

Nota-se na Figura 4 que a perda de umidade é maior no início do processo, onde as taxas de secagem são maiores, pois a quantidade de água presente na superfície da partícula é maior, o que facilita a evaporação.

Como o período de taxa decrescente é maior, pode-se verificar que os mecanismos convectivos e difusivos são relevantes nesta etapa. Quando a umidade em base seca se aproxima de zero, a difusão se torna o mecanismo dominante do processo de secagem.

Os dados experimentais da secagem, razão de umidade, tempo e temperatura, foram ajustados por modelos matemáticos comumente aplicados para cinética de secagem de produtos agrícolas. O modelo que melhor ajustou aos dados foi o de Page ($R^2 = 0,996$). A partir dos parâmetros do modelo de Page, encontrou-se a Equação 28, para a difusividade mássica efetiva. Os parâmetros deste e dos demais modelos testados estão na Tabela 4.

$$D_{ef}(T) = 2,175 \exp\left(\frac{-3268,627}{T}\right) \quad (28)$$

Tabela 4 – Parâmetros dos modelos cinéticos de secagem para o bagaço de malte.

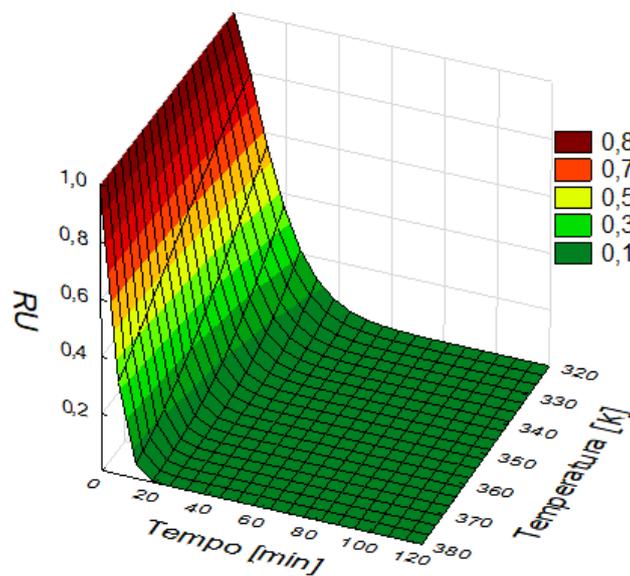
Modelo	R ²	Parâmetros do modelo	Parâmetros de Arrhenius
Wang e Sing	0,729	A -0,048 b 4,3.10 ⁻⁴	-
Verna	0,984	A 687,771	A1 36,030 Ea1 257,197 A2 35,981 Ea2 275,184
Thompson	0,430	A -11,414 b -0,307	-
Page	0,996	n 1,392	A 470,535 Ea 393,146
Newton	0,971	-	A 100,881 Ea 770,409
Midilli	0,960	a 0,980 b -5,2.10 ⁻⁵ n 1,449	A 594,995 Ea 409,850
Logarítmico	0,987	a 1,123 c -0,61032	A 82,3016 Ea 283,052
Henderson e Pabis	0,982	a 1,096	A 99,6811 Ea 285,882
Henderson e Pabis Modificado	0,995	a 30176,24 b -30175,2 c 0	A1 303,998 Ea1 307,098 A2 304,015 Ea2 306,997 A3 0,244 Ea3 48,908
Exponencial de Dois Termos	0,995	a 77,3061 b -76,3188	A 250,201 Ea 299,272
Dois Termos	0,990	a 1256,467 b -1255,40	A1 36,5091 Ea1 269,498 A2 36,4803 Ea2 269,487
Aproximação da Difusão	0,995	A -512,947 b 0,998	A 169,040 Ea 282,268

Fonte: Autores (2020).

Observam-se na Tabela 4 os valores dos parâmetros de todos os modelos cinéticos ajustados, na qual o modelo de Page foi o modelo mais preciso.

A Figura 5 apresenta a superfície de resposta obtida pelo ajuste do modelo de Page, que representa a razão de umidade (RU) em função do tempo e da temperatura, onde se nota que diminui o valor de RU quanto maior o tempo e a temperatura.

Figura 5 – Superfície de resposta para a razão de umidade em função do tempo e da temperatura.



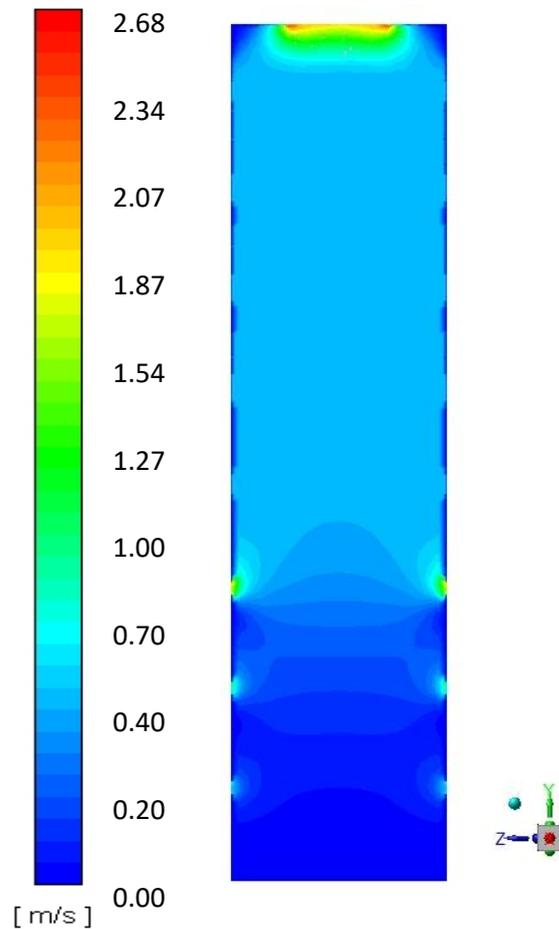
Fonte: Autores (2020).

Na Figura 5, observa-se que o aumento da temperatura faz com que a secagem ocorra de forma mais rápida, devido aos maiores gradientes de temperatura entre o ar e a partícula, que promovem maiores taxas de transferência de calor e de massa.

3.3. Fluidodinâmica computacional

A partir dos resultados da caracterização da partícula, foi possível se calcular a resistência viscosa ($2,028 \times 10^8$ 1/m²) e resistência inercial ($1,006 \times 10^4$ 1/m²) do leito poroso, de acordo com as Equações 26 e 27. Com estes dados foi possível se simular o leito preenchido por cevada, no programa Fluent®. A Figura 6 ilustra o perfil de velocidade encontrado.

Figura 6 - Perfil de contorno de magnitude de velocidade do ar (T=318 K) para o leito de cevada com entradas parcialmente fechadas.



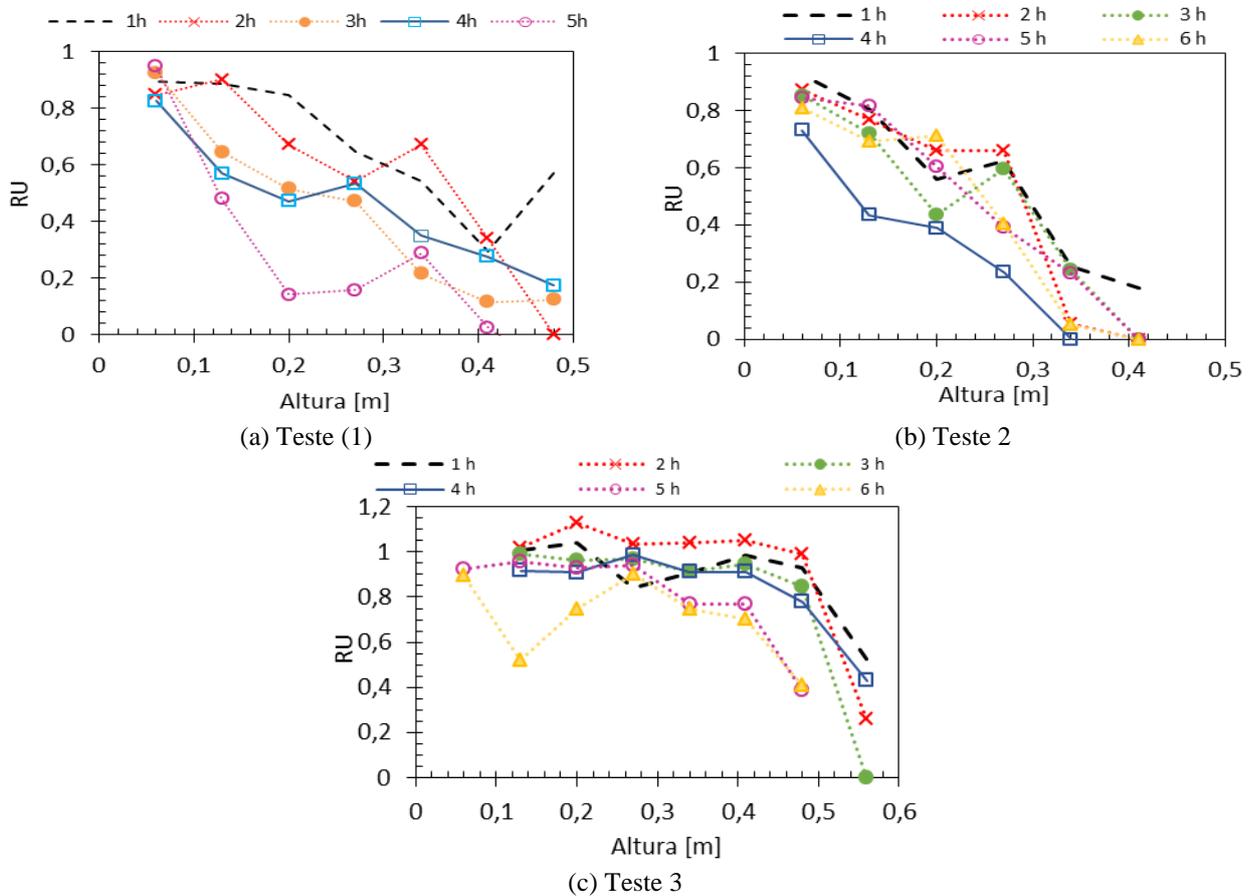
Fonte: Autores (2020).

Na Figura 6, as maiores velocidades são próximas ao topo do leito. Apenas na primeira camada da base a velocidade do ar é baixa, o que pode levar a uma menor secagem nessa região.

3.4. Secagem no secador solar de leito fixo

Foram realizados três testes, o primeiro teve início às 11h, o segundo às 10h 45 min e o terceiro às 11h 30 min. Todos os testes tiveram duração de 6 horas. A Figura 7 apresenta a razão de umidade em função da altura do leito fixo, para cada hora de teste.

Figura 7 – Testes realizados no secador solar de leite fixo: Perfil axial da Razão de Umidade (RU) com o tempo de secagem.

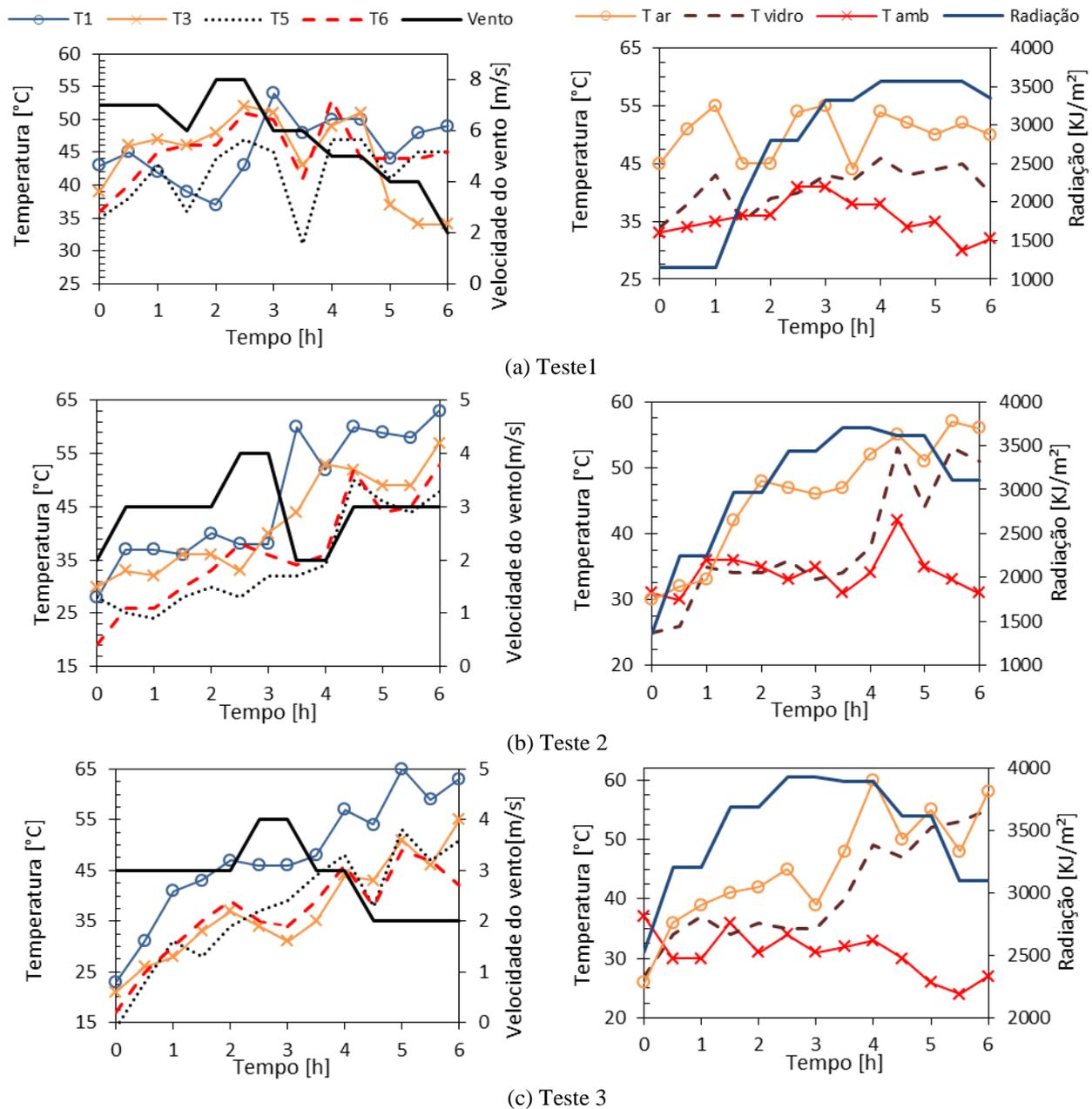


Fonte: Autores (2020).

Na Figura 7 nota-se, nos testes 1 (a) e Teste 2 (b), que RU diminuiu significativamente com o tempo ao longo do leite, sendo a secagem mais pronunciada nas alturas de leite acima de 20 cm até o topo, onde encontra-se o exaustor. Já o Teste 3 (c), mesmo após 6h de secagem, o leite ainda exibia valores altos de RU, mostrando que possivelmente as condições climáticas não favoreceram o teste. No entanto, observou-se ao fim do experimento um gradiente de umidade na direção radial, indicando que a secagem ocorreu preferencialmente próximo às alimentações de ar, onde o ar de entrada tinha alta temperatura e baixa umidade inicial. À medida que o ar entra em contato com as partículas e ocorre a secagem, o ar se torna mais úmido e frio, fazendo com que o interior do leite não seque de forma homogênea.

Durante o experimento, mediu-se a temperatura em diferentes pontos do leite fixo. A Figura 8 apresenta os dados das condições climáticas em que os testes foram realizados.

Figura 8 – Dados relativos às condições climáticas referentes aos testes 1 (a), Teste2 (b) e Teste (3): Velocidade do vento, temperatura na parede superior do leito (T1); temperaturas das partículas nas alturas de 0,48 m (T3); 0,2 (T5) e 0,06 m (T6), temperaturas do ar (T_{ar}), do ambiente (T_{amb}) e do vidro (T_{vidro}); radiação solar.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 8, observa-se que as temperaturas no equipamento, do ar no interior do forno e das partículas, tendem a aumentar com o aumento da radiação solar e diminuir com o aumento da velocidade do vento, devido às perdas de calor por convecção. Essas mudanças ocorreram mesmo com pequena variação da temperatura ambiente.

As menores temperaturas foram T5 e T6, que são as temperaturas das partículas nos pontos mais próximos à base do leito, onde estão localizadas as entradas de ar. Stoppe et al. (2020) mostrou por meio de simulações de fluidodinâmica computacional (CFD) que a velocidade do ar neste equipamento é menor em posições distantes do exaustor.

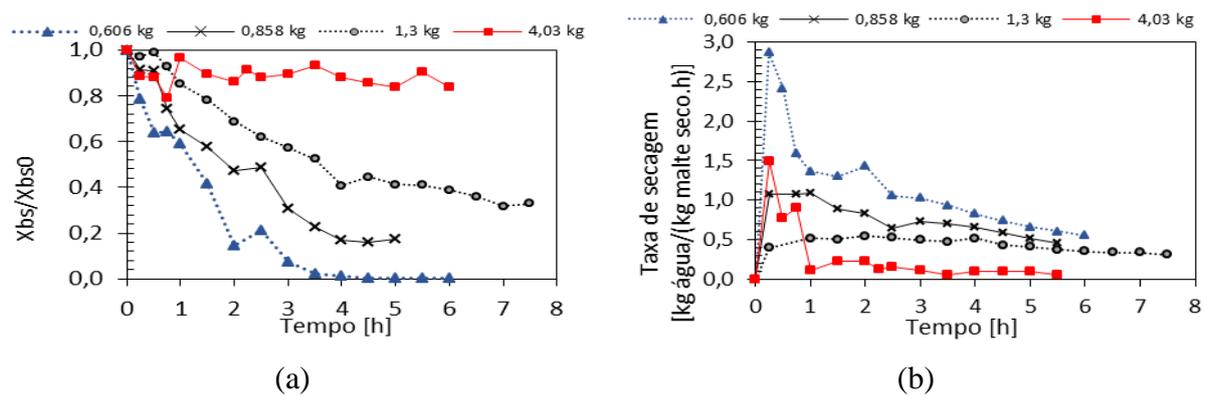
As maiores temperaturas foram registradas para o ar de secagem dentro do forno (Tar) e na parede do leito fixo metálico (T1), a qual possui maior contato com a radiação solar e a sua cor preta auxilia na absorção de calor.

Os resultados de secagem do Teste 2 foram os que apresentaram menor taxa de secagem. Provavelmente isso ocorreu devido à baixa incidência de radiação solar e baixa temperatura ambiente nas primeiras horas de secagem, o que fez que a temperatura da parede do leito (T1) só ultrapassasse os 40°C após 3 h de secagem.

3.5. Secagem na estufa solar

Foram realizados quatro testes de secagem de resíduos de cevada na estufa solar, com diferentes massas do material. Os testes tiveram início às 11h30, 13h, 10h45 e 11h30; respectivamente. A Figura 9 apresenta a razão entre a umidade em base seca com a umidade base seca inicial do material (a), bem como taxa de secagem ao longo do teste (b).

Figura 9 – Secagem na Estufa Solar para as massas de bagaço de malte de 0,606 kg; 0,858 kg; 1,3 kg e 4,0 kg: (a) Razão de Umidade e (b) taxa de secagem em função do tempo.



Fonte: Autores (2020).

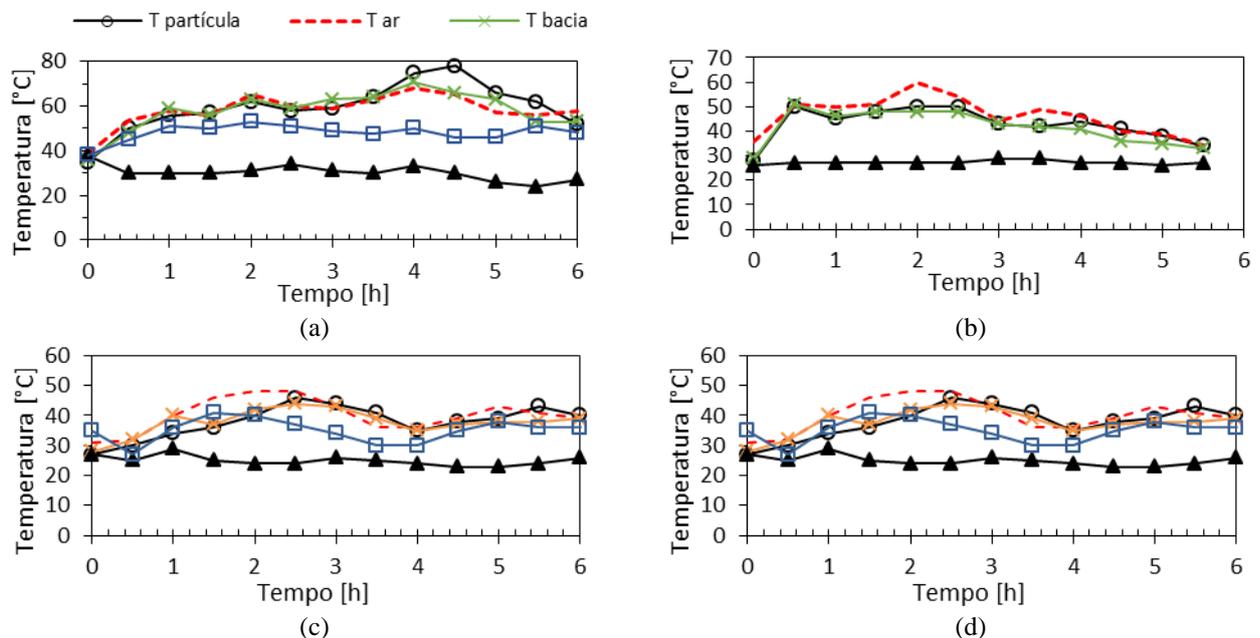
Observa-se na Figura 9a que o aumento da massa inicial de bagaço de malte na bacia ocasiona a diminuição da velocidade de secagem, uma vez que a quantidade de umidade a ser removida é maior. Observa-se também que a taxa de secagem (Figura 9b) é inversamente proporcional à massa de material alimentado na estufa.

Independente da massa inicial, a primeira uma hora de secagem é o período em que se são obtidas as maiores taxas de remoção de umidade, sendo a taxa máxima observada aos 15 min de operação. Assim, para o teste com 0,606 kg de resíduo, obteve-se uma remoção máxima de até 2,87 kg de água/(kg de sólido seco.h). Assim, à medida que se aumenta a massa de material dentro da estufa, a quantidade de água evaporada conduz a um aumento da umidade do ar de secagem dentro da estufa e da umidade de equilíbrio, limitando a secagem.

Apesar de renovar o ar a cada 30 min e remover a água condensada na parede da estufa, a quantidade total de água que necessita se evaporada está além da capacidade do secador. Assim, é mais eficiente secar bateladas de 1 kg de material por 1 ou 2 horas do que colocar quantidades maiores de material na estufa solar secador. No teste empregando 1,3 kg de material (Figura 9a), observou-se que em 4h de secagem cerca de 60% da umidade total já havia sido removida, sendo as demais 4 h empregadas na remoção de apenas mais 8% de umidade total, atingindo-se massa aproximadamente constante.

A Figura 10 apresentam as temperaturas no equipamento e ambiente, velocidade do vento e radiação solar ao longo dos testes com diferentes massas iniciais de sólido na estufa.

Figura 10 – Dados de temperaturas durante os experimentos de secagem em estufa solar, com as massas iniciais de sólido de: (a) 0,606 kg; (b) 0,858 kg; (c) 1,3 kg e (d) 4,03 kg.



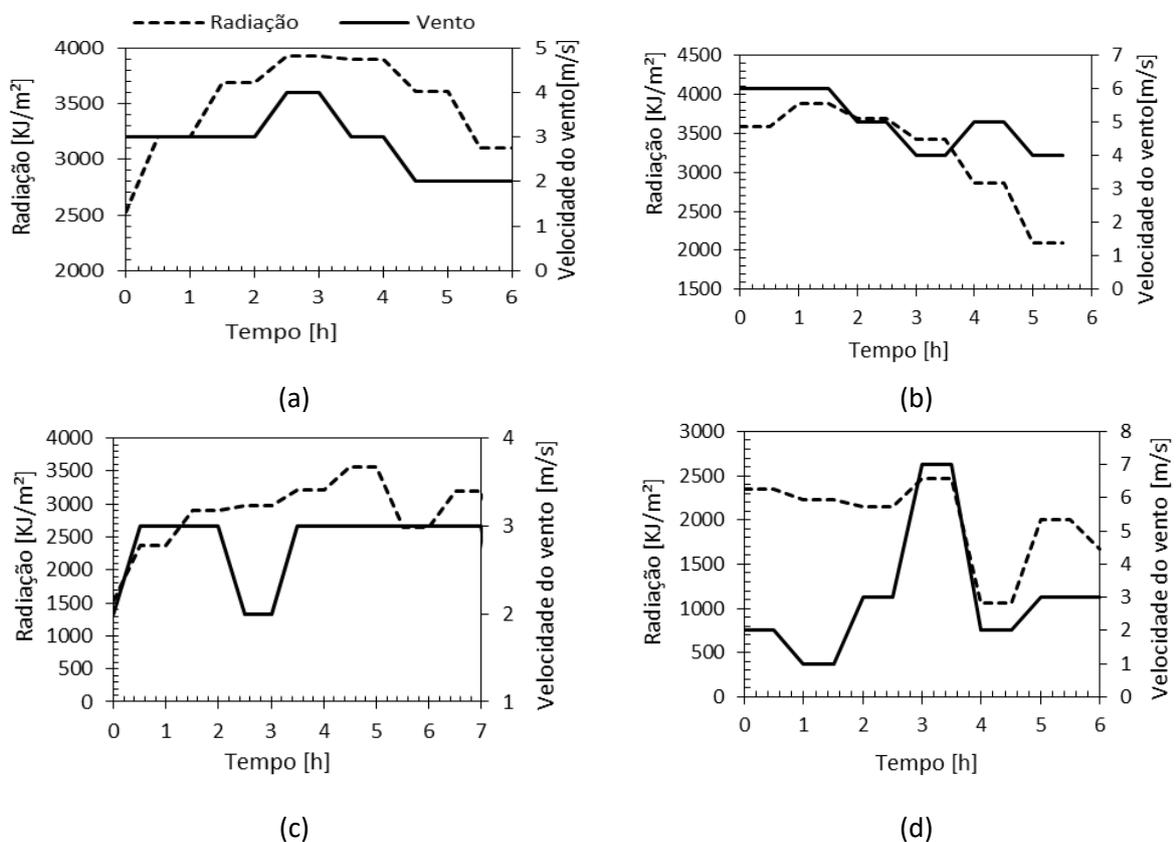
Fonte: Autores (2020).

Na Figura 10a observa-se que os maiores valores para a temperatura foram obtidos no experimento com 0,606 Kg. A temperatura do ar no interior da estufa chegou à 68°C,

enquanto que temperatura atingiu os 78°C para 4,5 h de secagem. Assim, o aquecimento elevado das partículas indica que neste ponto a maior quantidade de água já havia sido removida.

A Figura 11 mostra as condições de radiação solar e velocidade do vento durante a realização dos testes de secagem empregando a estufa solar.

Figura 11 – Dados de radiação solar e velocidade do vento durante os experimentos de secagem em estufa solar, com as massas iniciais de sólido de: (a) 0,606 kg; (b) 0,858 kg; (c) 1,3 kg e (d) 4,03 kg.



Fonte: Autores (2020).

De acordo com a Figura 11, o aumento da radiação solar e a diminuição da velocidade do vento estão diretamente relacionados à elevação da temperatura na estufa solar, como também ocorreu nos testes no secador solar de leito fixo. Pode-se observar que a radiação solar se manteve alta durante quase todo o experimento e que os picos de temperatura coincidiram com a diminuição da velocidade do vento.

O teste com 4 kg de resíduos de cevada foi realizado em um dia com menor incidência de radiação solar. Nota-se na Figura 11d que os valores para a radiação solar foram os

menores e a velocidade do vento atingiu seu valor máximo de 7 m/s, valor elevado se comparado aos demais testes. Logo, as temperaturas do equipamento também foram menores.

4. Considerações Finais

A partir da secagem no analisador de umidade infravermelho, conclui-se que quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem e que o processo é regido pela difusão. Pelos dados obtidos experimentalmente, o melhor modelo cinético de secagem dos resíduos de malte foi o modelo de Page.

Como a compactação do leito se mostrou elevada, a secagem apresentou dificuldades ao ser realizada em uma coluna de leito fixo. O ponto de secagem mais intenso ocorreu, preferencialmente, nos locais mais elevados do leito, próximo ao exaustor. Onde pela análise fluidodinâmica, sabemos que há uma circulação mais acentuada de ar. Por mais que a configuração do secador, escolhida por estudos anteriores, apresenta-se em uma circulação de ar homogênea, a compactação do leito interferiu de forma mais penosa.

Para melhorar a eficiência do secador, pode-se inserir um equipamento de exaustão do ar e diminuir a área da seção transversal do leito. Essas medidas tendem a diminuir a umidade no interior da câmara e melhorar a ventilação no leito.

Na secagem na estufa solar, conclui-se que o processo é mais indicado para menores massas do material, pois a secagem ocorre de forma homogênea e em um período menor. Nos experimentos com maiores massas, a secagem ocorre preferencialmente na camada superior, que fica em contato direto com o ar de secagem.

Concluiu-se, também, que o aumento da radiação solar e a diminuição da velocidade do vento tendem a elevar a temperatura do equipamento, das partículas e do ar de secagem; o que torna o processo mais eficiente.

Como sugestão para trabalho futuro, propõe-se a realização de uma pré-secagem na estufa solar, de pequenas quantidades de material, durante um período mais curto, de cerca de 1 h, e posteriormente, finalizar a secagem no secador solar de leito fixo.

Agradecimentos

À UFTM, ao PMPIT, à Fapemig e ao CNPq.

Referências

Araújo, VP & Vasconcelos, AKP. (2019). Construction of a Solar Distiller as an Alternative for the Development of Practical Classes in Teaching Chemistry. *Research, Society and Development*, 8(7), e17871115.

Bontempo, LHS, Castejon, LV & Santos, KG. (2020). Secagem da casca de tangerina: cinética e desempenho do secador solar convectivo. *Research, Society and Development*, 9(6), e44963458.

Canal Rural. (2014). Resíduo de cevada é mais vantajoso que milho como forragem. Acesso em: 7 maio 2020. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/noticias/residuo-cevada-mais-vantajoso-que-milho-como-forragem-8407/>

Celestino, SMC. (2010). *Princípios de secagem de alimentos*, Planaltina: Embrapa Cerrados.

Cremasco, MA. (2012). *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*. 2.ed. [S.l.]: São Paulo: Blucher.

Evangelista Neto, AA. (2013). Secagem de grãos de girassol em leito fixo e em leito de jorro. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Fonseca, JPSM., Ferrari, EMM & Cardose, RB. (2018). Analysis of the energy and economic impacts of the Brazilian energy labeling program (PBE/Inmetro) on solar thermal collectors in Brazil. *Research, Society and Development*, 7(1), 1-17, e1071180.

Guimarães, G, Silva, JT, Santos, KG & Vieira Neto, JL. (2020). Sequencing of unit operations for integral and sustainable peanut processing. *Research, Society and Development*, 9(6), e67963449.

Nascimento, VRG. (2014). Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera Lam. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Unicamp, Campinas.

Nordeste Rural. (2017). Secador solar permite grãos mais saudáveis para a produção de ração. Acesso em: 7 maio 2020. Disponível em: <http://nordesterural.com.br/secador-solar-permite-graos-mais-saudaveis-para-producao-de-racao/>.

Paiva, LS & Sousa, NG. (2015). Simulação e Análise de um sistema de refrigeração por absorção e aquecimento solar. *Rev. Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 1, 25-42.

Pereira, AS, Shitsuka, DM, Parreira, FJ & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Acesso em: 20 maio 2020.

Disponível em:

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.

Resende, O, Ferreira, LU & Almeida, DP. (2010). Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 12(2), 171-78.

Santini, EJ. (1983). Secagem de madeira serrada em estufa solar e sua comparação e sua comparação com os métodos convencionais. *Revista Floresta*, 14(2), 61-70.

Santos, KG, Campos, AVP, Ferreira, LV, Santana, RC & Barrozo, MAS. (2013). Fluid Dynamics of a Sand-Biomass Mixture in a Spouted-Bed Reactor for Fast Pyrolysis. *Chem. Eng. Technol.*, 36(12), 2148–2154.

Santos, KG, Francisquetti, MCC, Malagoni, RA & Barrozo, MAS. (2015). Fluid Dynamic Behavior in a Spouted Bed with Binary Mixtures Differing in Size. *Drying Technology*, 33(14), 1746-757.

Silva, JS. (2008). *Secagem e armazenamento de produtos agrícolas*. Viçosa: Aprenda Fácil.

Silva, JM. (2012). Viabilidade do uso de secadores solar de convecção natural e forçada para a secagem de Coco Licuri. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Silva, LRC, Ribeiro, MBM, Oliveira, AD, Silva, CS, Faria, EV & Santos, KG. (2019). Destilação solar do solvente etanol proveniente da extração de óleo de coco. *Brazilian Journal of Development*, 5, 28964-28982.

Silva, S.T & Sousa, NG. (2020). Auxiliary solar heating system: simulation and control. *Research, Society and Development*, 9(3), e188932730.

Silvério, BC, Freitas, CM, Santos, KG, Franco, PIBM. & Antoniosi Filho, NR. (2017). Isoconversional Kinetic Analysis of Pyrolysis of Malt Waste. *Materials Science Forum*, 899, 107-12.

Stangerlin, DM, Santini, EJ, Susin, F, Melo, RR, Gatto, DA & Haselein, CR. (2009). Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. *Ciência Florestal*, 19(4), 461-72.

Stoppe, ACR, Vieira Neto, JL & Santos, KG. (2020). Development of a fixed bed solar dryer: experimental study and CFD simulations. *Research, Society and Development*, 9(3), e123932667.

Souza, GFMV. (2013). Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

Tavares, FP, Silvério, BC, Vieira Neto, JL & Santos, KG. (2019). Extração sustentável de óleo de pinhão manso com solvente aquecido por radiação solar. *Brazilian Journal of Development*, 5, 28909-28925.

Tavares, SR & Sousa, NG. (2019). Sistema de aquecimento solar de água: simulação e análise. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 4(1), 15-31.

Terra, SDV, Goulart, BV, Fagundes, PMLL, Nadaleti, DHS & Kondo, MM. (2020). Photodegradation of dipyrone by heterogeneous catalysis using TiO₂/UV. *Research, Society and Development*, 9(1), e73911646.

Venturin, ACZ & Silva, LC. (2019). Modeling and simulation of paddy drying: a bibliometric analysis. *Research, Society and Development*, 8(1), e4881658.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Amanda Alves Rocha – 20%

Ana Carolina Ribeiro Stoppe – 20%

Beatriz Cristina Silvério – 20%

Kássia Graciele dos Santos – 20%

José Luiz Vieira Neto – 20%