



DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA SECAGEM DO RESÍDUO DE VAGEM DE SOJA FERMENTADA

ANNA C. L. GONÇALVES^{1*}, ANA C. MEDEIROS¹, LORENA CADAN¹, PAOLLA S. MELEGARI¹, ALEXANDRE DIÓRIO¹

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR
*e-mail: aclara.labes@gmail.com

RESUMO - A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), gera produto com grande relevância no mercado agroindustrial. Uma das maneiras de se reaproveitar o resíduo gerado é utilizá-lo como adsorvente. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a secagem convectiva do resíduo de soja fermentado com ar nas velocidades de 0,82 e 1,97 m/s e nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais. Para a menor velocidade, o modelo de Henderson-Pabis foi o que melhor descreveu o processo de secagem nas três temperaturas, enquanto para a maior velocidade, o melhor modelo foi Dois Termos. A difusividade aumentou em relação à elevação de temperatura e velocidade, e os valores médios desse parâmetro para as secagens a 0,82 e 1,97 m/s foram de, respectivamente, $6,48 \times 10^{-7}$ e $1,01 \times 10^{-6}$ m² s⁻¹. Ademais, a energia de ativação para um mol de água em difusão no interior do resíduo durante sua secagem foi estimada em 4,21 kJ mol⁻¹ para o ar a 0,82 m/s e 31,68 kJ mol⁻¹ para 1,97 m/s. Logo, concluiu-se que a melhor condição para a secagem do resíduo de soja fermentado foi a 70 °C com o ar a 1,97 m/s.

INTRODUÇÃO

A soja, também conhecida como *Glycine max* (L.) Merrill, tem origem no sudoeste asiático, ganhando espaço na economia a partir de meados do século XX, visto que o produto gerado tem grande relevância no mercado agroindustrial para a produção de ração animal e óleo vegetal (Botelho *et al.*, 2018).

De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), aproximadamente 41 milhões de toneladas de resíduos de soja são gerados anualmente no Brasil. Esse resíduo é utilizado para produzir materiais de alto valor agregado e alta performance. A estimativa é de que 2700 t de resíduos são gerados para cada 1 t de grãos processados, ou seja, a geração é de 270% de resíduos no processamento da cultura desse grão (Martins, 2015).

Para que o resíduo da soja possa ser reaproveitado, uma das operações requeridas é a secagem, visto que a remoção da umidade

prolonga o tempo de vida útil do material, diminui a deterioração por microrganismos e evita alterações físico-químicas, tais como oxidação (Ferreira, 2022). Uma das formas de reutilizar esse resíduo é a sua aplicação como adsorvente, para isso, a secagem garante maior quantidade de sítios livres para a adsorção, aumentando a eficiência do processo ao diminuir o teor de umidade do resíduo de soja. (Oliveira *et al.*, 2001).

A secagem é o processo de desidratação dos grãos por evaporação. Nessa operação, a passagem de ar quente leva à elevação da temperatura do material e, com isso, a água é transportada do interior para a superfície do grão e da superfície dele para o ar por convecção. Assim, ocorre simultaneamente, os processos de transferência de calor e massa (Bortolaia, 2011). Dessa maneira, o objetivo do trabalho foi realizar a secagem convectiva em camada fina do resíduo de soja fermentado com ar nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e nas

velocidades de 0,82 m/s e 0,97 m/s e ajustar os modelos matemáticos aos dados experimentais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O resíduo de vagem de soja fermentada utilizado foi fornecido pela COCAMAR, cooperativa agroindustrial localizada em Maringá-PR. O resíduo foi gerado após o processo de “triadeira”. Esse processo separa a maior quantidade possível de grãos, os quais seguem para o processo principal, dos resíduos, que atualmente são armazenados no pátio. O resíduo de soja é composto por cascas de vagem de soja e pedaços da própria planta, como caule e alguns tipos de ervas daninhas; o resíduo de milho contém o sabugo e algumas partes do caule da planta,

Métodos

Determinação da umidade inicial: A umidade inicial do resíduo de soja foi determinada por meio do método gravimétrico (AOAC, 2005). Para isso, 4 g do material foram colocadas em uma estufa (Fanem 315 SE) a 105 ± 2 °C durante 24 h. A umidade inicial em base seca (X) foi determinada por meio da diferença de massas antes ($m_{úmida}$) e após (m_{seca}) a etapa de secagem conforme a Equação 1.

$$X = \frac{(m_{úmida} - m_{seca})}{m_{seca}} \quad (1)$$

Secagem em camada fina: A secagem em camada fina do resíduo de soja ocorreu em um secador convectivo de bancada com fluxo transversal dispondo uma camada fina de 100 g

do material em uma peneira. O módulo é composto por um soprador de ar, com ajuste de velocidade, ligado a um duto metálico com quatro resistências elétricas. O duto se conecta a uma caixa de aço por onde passa o ar aquecido que segue até uma bandeja perfurada, a qual serve de suporte. A temperatura é ajustada a partir das resistências elétricas, controladas por um reostato. A indicação da temperatura é feita por um termopar inserido abaixo da bandeja. O processo de secagem foi conduzido nas temperaturas de 50, 60, 70 °C \pm 2 °C. A variação mássica das amostras foi medida em balança semi-analítica (Gehaka modelo BG 4000 com precisão de 0,01 g) em intervalos regulares de 2 ou 3 min de secagem até ser verificada a obtenção de massa constante, ou seja, que o equilíbrio dinâmico da secagem foi atingido. Os dados experimentais de secagem foram adimensionalizados (X_{adm}) conforme apresentado na Equação 2.

$$X_{adm} = \frac{(X - X_e)}{(X_0 - X_e)} \quad (2)$$

Em que X_0 representa a umidade inicial; X representa a umidade no tempo t da secagem; X_e representa a umidade do material no equilíbrio (após 24 h).

Modelos de secagem: Os modelos de secagem apresentados na Tabela 1 foram ajustados aos dados experimentais de secagem, sendo que a qualidade do ajuste foi verificada por meio dos coeficientes de determinação (R^2) e do chi-quadrado reduzido (χ^2).

Tabela 1: Modelos de secagem em camada fina

Equação	Modelo	Referência	Eq
$X_{adm} = \exp(-k_1 \cdot t)$	Le	Bruce (1985)	(3)
$X_{adm} = \exp(-k_2 \cdot t^{n_1})$	Pa	Page (1949)	(4)
$X_{adm} = a_1 \cdot (\exp(-k_3 \cdot t^{n_2}))$	HP	Henderson (1974); Wang <i>et al.</i> , (2007)	(5)
$X_{adm} = a_2 \cdot \exp(-k_4 \cdot t) + b_1$	LN	Yaldiz <i>et al.</i> , (2001); Togrul and Pehlivan (2002)	(6)
$X_{adm} = a_3 \cdot \exp(-k_5 \cdot t^{n_3}) + b_2 \cdot t$	MK	Midili <i>et al.</i> , (2002); Hii <i>et al.</i> , (2009)	(7)
$X_{adm} = a_4 \cdot \exp(-k_6 \cdot t) + b_3 \cdot \exp(-k_7 \cdot t)$	TT	Rahman (1998); Togrul and Pehlivan (2002)	(8)

Le: Lewis; Pa: Page; HP: Henderson-Pabis; LN: Logarithmic; MK: Midili-Kucuk; TT: Two Terms; WS: Wang-Sing.

Os parâmetros k_i , n_i , a_i e b_i representam os parâmetros dos modelos conforme suas respectivas equações e foram determinados por meio dos ajustes lineares ou não lineares de cada modelo conforme Chen *et al.* (2012).

Determinação das taxas de secagem: As curvas de taxas de secagem foram obtidas conforme descrito em Motta Lima *et al.* (2001). Brevemente, o método consiste nas derivadas numéricas dos dados de secagem e emprega o método das diferenças finitas centradas, isto é, $\Delta X/\Delta t$ para cada ponto i da secagem conforme a Equação 9.

$$\left. \frac{\Delta X}{\Delta t} \right|_i = \frac{(\Delta X/\Delta t)_{i-} + (\Delta X/\Delta t)_{i+}}{2} \quad (9)$$

Em que $(\Delta X/\Delta t)_{i-}$ foi empregado entre os pontos $(i-1)$ e i ; $(\Delta X/\Delta t)_{i+}$ foi empregado para os pontos i e $(i+1)$; $(\Delta X/\Delta t)_{i-}$ ou $(\Delta X/\Delta t)_0$ foi empregado para o ponto inicial; e $(\Delta X/\Delta t)_{i+}$ para o equilíbrio.

Curva generalizada de secagem (CGS) e normalizada de taxa de secagem (TSN): A CGS foi desenvolvida a partir do modelo de Page (1949), conforme descrita na Equação 10, e obtida a partir da generalização dos dados de secagem por meio do tempo adimensional (τ) definido na Equação 11.

$$X_{adm} = \exp(-\alpha_1 \cdot \tau^{\beta_1}) \quad (10)$$

Em que α_1 e β_1 são os parâmetros do modelo a serem estimados.

$$\tau = \frac{R_{max} \cdot t}{X_0} \quad (11)$$

Em que R_{max} (min^{-1}) representa a maior taxa de secagem observada no instante inicial $t=0$; t é o tempo de secagem (min); e X_0 representa a umidade inicial do material.

A curva normalizada de taxa de secagem (TSN) foi desenvolvida a partir do modelo de Hodges (1982) conforme a Equação (12). A diferença entre a TSN e a CGS reside no fato da primeira normalizar o valor da taxa de secagem instantânea (R) enquanto esta última apenas considera o seu valor máximo (R_{max}).

$$TSN = \frac{R}{R_{max}} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X_{adm}}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right] \quad (12)$$

Em que α_2 e β_2 são os parâmetros do modelo a serem estimados.

Determinação do coeficiente de difusividade e da energia de ativação: A migração da umidade do interior do material sólido para sua superfície, por unidade de tempo, é um fenômeno difusional descrito matematicamente por meio da segunda lei de Fick (Equação 13). Nessa lei, o coeficiente de difusividade, D , representa a proporcionalidade entre a taxa de evaporação de água a partir da superfície do material e a difusão interna da umidade.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \cdot (\nabla^2 X) \quad (13)$$

Em que $\partial X/\partial t$ representa a taxa de secagem ($\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}_{\text{sólido seco}}^{-1} \text{min}^{-1}$); D é o coeficiente de difusividade ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) e $\nabla^2 X$ representa a difusão da umidade ao longo do material sólido.

A solução da segunda lei de Fick foi desenvolvida por Crank (1975) considerando distribuição uniforme de umidade, que a difusão intrapartícula é o mecanismo dominante de transferência de massa e que a difusividade é uma constante independente da umidade da amostra. Essa solução é apresentada na Equação 14.

$$X_{adm} = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left(-\frac{(2j+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4 \cdot L^2}\right) \quad (14)$$

Em que t é o tempo de secagem (min), L é a metade da espessura da amostra (m); j é um inteiro positivo.

Conforme apresentado por Doymaz (2007), é possível determinar a difusividade a partir da Equação 15 desde que a geometria do material em secagem seja longa, isto é, tende ao infinito. Quando esse critério é admissível, então a aproximação apenas para o primeiro termo da soma infinita não causa erros significativos na determinação do parâmetro conforme a Equação 15.

$$\lambda = \frac{\pi^2 \cdot D}{4 \cdot L^2} \quad (15)$$

Em que λ é o coeficiente angular da Equação 14 linearizada; L é a altura da camada

delgada de material (m); e D é o coeficiente de difusividade ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

A dependência da difusividade com a temperatura é obtida a partir de uma equação tipo Arrhenius demonstrada por Vega-Gález *et al.* (2009) e apresentada na Equação 16.

$$D = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (16)$$

Em que D_o representa o fator pré-exponencial da equação-tipo Arrhenius ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); E_a representa a energia de ativação da difusão de água, ou seja, a quantidade de energia necessária para que um mol de água se difunda através do interior do material até sua superfície e evapore (kJ mol^{-1}); R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e T é a temperatura absoluta (K).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas de Secagem e de Taxa de Secagem

O resíduo de soja apresentou umidade inicial média de $0,6165 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{sólido seco}}$. Esse valor foi cerca de quatro vezes maior que a umidade inicial dos grãos de soja, como exposto por Santos (2013). O valor elevado da umidade do resíduo em relação ao seu grão pode ser justificado pelas condições de armazenamento, visto que o resíduo se encontra disposto em local aberto. As curvas de secagem do resíduo de soja fermentado nas diversas temperaturas avaliadas para as velocidades de 0,82, e 1,97 m/s foram apresentadas na Figuras 1 e 2, respectivamente.

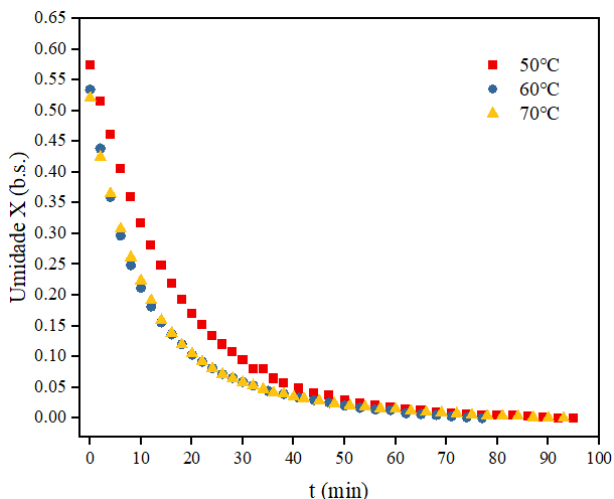


Figura 1: Curvas de secagem a 50, 60 e 70 °C do resíduo a 0,82 m/s.

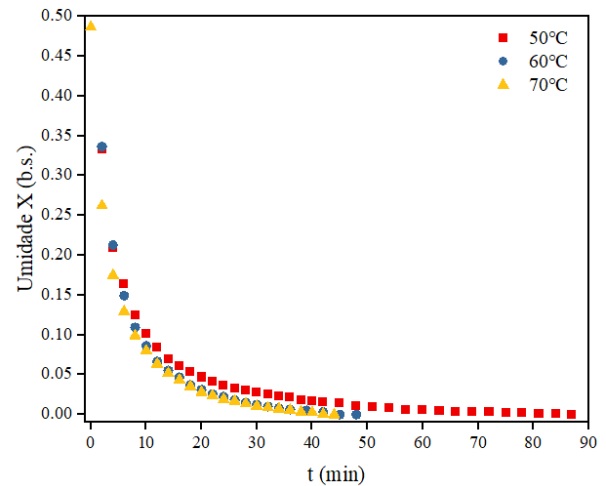


Figura 2: Curvas de secagem a 50, 60 e 70 °C do resíduo a 1,97 m/s.

A análise das figuras expôs que, após a secagem, a umidade de equilíbrio atingida foi menor que $0,003 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{sólido seco}}$ para todas as temperaturas avaliadas nas duas velocidades. Ainda, para a velocidade de 0,82 m/s observou-se que o tempo necessário para o processo de secagem foi maior em relação à velocidade de 1,97 m/s, chegando ao tempo máximo de secagem de 95 min para a temperatura de 50°C, enquanto para a mesma temperatura à velocidade superior, o tempo de secagem foi de 87 min. O resultado condiz com o esperado, visto que o aumento da temperatura resultou numa maior transferência de massa e diminuiu a umidade de equilíbrio dinâmico e o tempo de secagem (Batista, 2016).

Na Figura 3 foram apresentadas as curvas de taxas de secagem nas temperaturas e velocidades avaliadas.

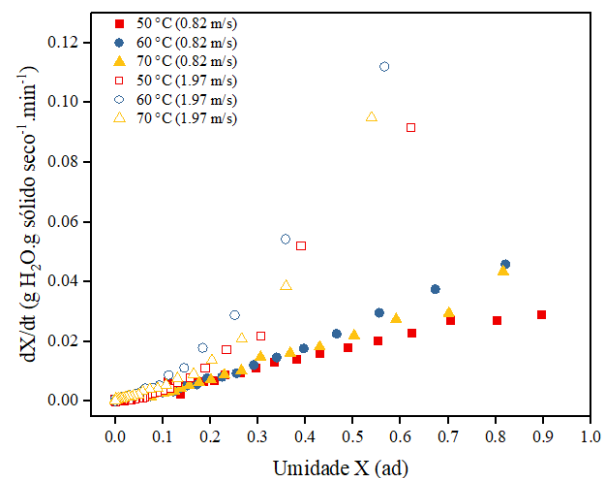


Figura 3: Taxas de secagem do resíduo de soja fermentado nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C a 0,82 e 1,97 m/s.

A Figura 2 revelou que os perfis das taxas de secagem foram semelhantes, visto que para as três temperaturas utilizadas nas velocidades de 0,82 e 1,97 m/s foi observado apenas o período de taxa de secagem decrescente, o que indica que a umidade presente no resíduo analisado já é inferior que o teor de umidade crítico (Santos, 2013). Ademais, mostra que a difusão é o mecanismo dominante no movimento da umidade (Menezes *et al.*, 2013). Para a velocidade de 0,82 m/s a taxa de secagem foi menor, variando de, aproximadamente, 0,03 a 0,04 $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}^{-1} \text{sólido seco min}^{-1}$. A velocidade de 1,97 m/s apresentou maiores taxas de secagem,

as quais variaram entre, 0,09 e 0,11 $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}^{-1} \text{sólido seco min}^{-1}$.

Modelagem da Secagem do Resíduo de Soja Fermentado

Os modelos de secagem foram ajustados aos dados experimentais e seus parâmetros estatísticos são apresentados na Tabela 2 para a velocidade de 0,82 m/s e na Tabela 3 para a velocidade de 1,97 m/s. Os melhores ajustes, isto é, com maior R^2 e menor χ^2 foram assinalados em negrito para melhor visualização.

Tabela 2: Parâmetros estatísticos para a secagem a 0,82 m/s do resíduo de soja fermentado.

T (°C)	50		60		70	
Eq.	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
(3)	0,9997	$2,01 \times 10^{-5}$	0,9906	$6,03 \times 10^{-4}$	0,9941	$3,53 \times 10^{-4}$
(4)	0,9998	$1,42 \times 10^{-5}$	0,9988	$7,95 \times 10^{-5}$	0,9989	$6,69 \times 10^{-5}$
(5)	0,9998	$1,30 \times 10^{-5}$	1,0000	$7,41 \times 10^{-5}$	1,0000	$6,57 \times 10^{-5}$
(6)	0,9998	$1,41 \times 10^{-5}$	0,9957	$2,75 \times 10^{-4}$	0,9977	$1,34 \times 10^{-4}$
(7)	0,3573	0,0482	0,5891	0,0262	0,5442	0,0271
(8)	0,9998	$1,45 \times 10^{-5}$	0,9998	$1,49 \times 10^{-5}$	0,9998	$1,94 \times 10^{-5}$

Tabela 3: Parâmetros estatísticos para a secagem a 1,97 m/s do resíduo de soja fermentado.

T (°C)	50		60		70	
Eq.	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
(3)	0,9601	0,0015	0,9789	0,0011	0,9661	0,0018
(4)	0,9995	$2,47 \times 10^{-5}$	0,9987	$7,13 \times 10^{-5}$	0,9956	$1,68 \times 10^{-5}$
(5)	0,9956	$1,71 \times 10^{-5}$	0,9886	$7,42 \times 10^{-5}$	0,9995	$2,59 \times 10^{-5}$
(6)	0,9791	$8,06 \times 10^{-4}$	0,9887	$6,09 \times 10^{-4}$	0,9797	0,0011
(7)	0,3705	0,0243	0,4290	0,0307	0,4184	0,0307
(8)	0,9994	$2,42 \times 10^{-5}$	0,9999	$3,75 \times 10^{-6}$	0,9999	$6,67 \times 10^{-6}$

A Tabela 2 revelou que, dos seis modelos analisados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem a 0,82 m/s foi o modelo de Henderson-Pabis, sendo que para a temperatura de 50 °C os modelos de Page, Logarítmico e Dois Termos também apresentaram R^2 e χ^2 tendendo a unidade e ao valor nulo, respectivamente. Assim, considerou-se que o modelo de Henderson-Pabis foi o que melhor descreveu o processo de secagem do resíduo de soja fermentado nas três temperaturas. As curvas ajustadas do melhor modelo foram apresentadas na Figura 4 e seus parâmetros para cada temperatura foram dispostos na Tabela 4.

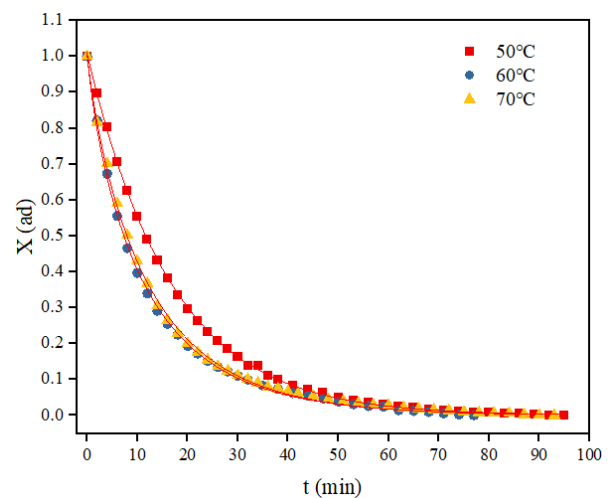


Figura 4: Ajuste do modelo de Henderson-Pabis aos dados de secagem a 0,82 m/s do resíduo de soja fermentado.

Pela Tabela 3, observou-se que dentre os seis modelos aplicados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem a 1,97 m/s foi o modelo Dois Termos para as temperaturas de 60 e 70 °C e Page para a temperatura de 50 °C os modelos de Page, com R^2 e χ^2 tendendo a unidade e ao valor nulo. Dessa forma, determinou-se que o modelo Dois Termos foi o que melhor descreveu o processo de secagem para as três temperaturas. A Figura 5 expõem o melhor modelo para os dados e os parâmetros determinados para cada temperatura foram dispostos na Tabela 5.

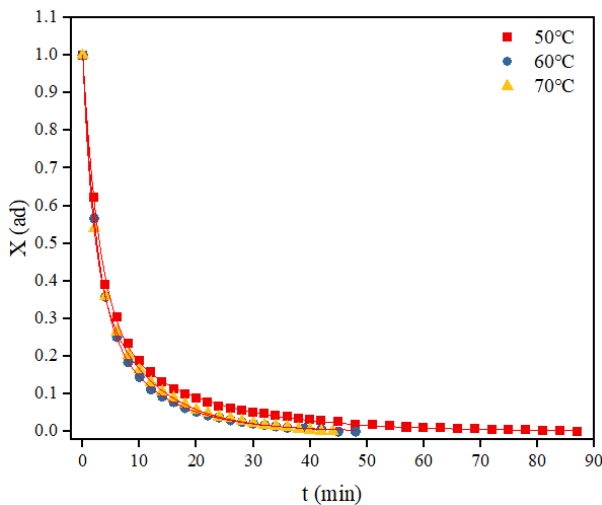


Figura 5: Ajuste do modelo Dois Termos aos dados de secagem a 1,97 m/s do resíduo de soja fermentado.

Tabela 4: Parâmetros ajustados do modelo de Henderson-Pabis para a secagem do resíduo de soja fermentado a 50, 60 e 70 °C a 0,82 m/s.

T (°C)	a ₁	k ₃	n ₂
50	1,0062	0,0584	1,0107
60	1,0148	0,1366	0,8274
70	1,0098	0,1182	0,8616

Tabela 5: Parâmetros ajustados do modelo Dois Termos para a secagem do resíduo de soja fermentado a 50, 60 e 70 °C a 1,97 m/s

T (°C)	a ₄	k ₆	b ₃	k ₇
50	0,7196	0,3395	0,2806	0,0565
60	0,6484	0,4254	0,3513	0,0956
70	0,4596	0,1032	0,5401	0,5859

CGS e TSN

Foram feitos os ajustes CGS e TSN aos dados experimentais de secagem nas

temperaturas de 50, 60 e 70 °C para ambas as velocidades. Dessa maneira, foi possível representar seus fenômenos em qualquer uma dessas temperaturas. Essas curvas foram apresentadas na Figuras 6 (A) e (B), respectivamente.

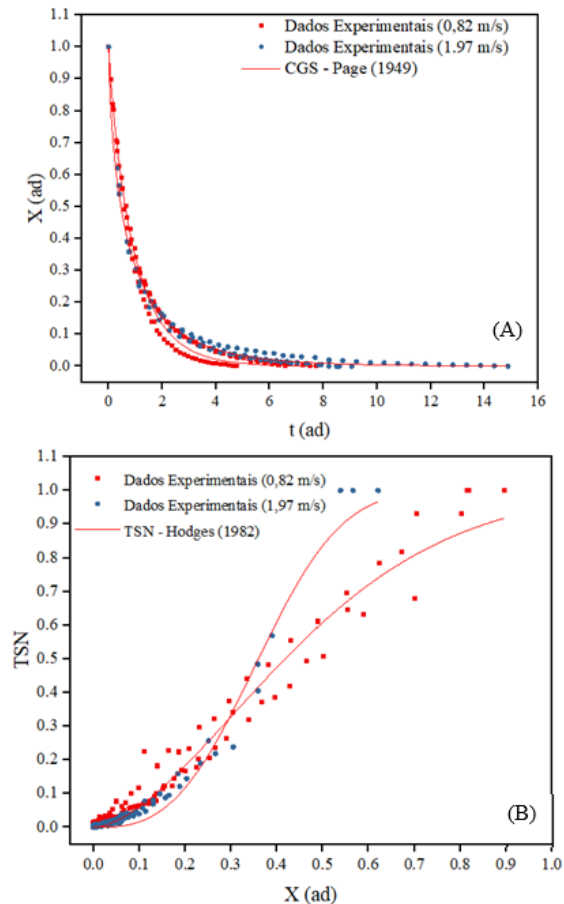


Figura 6: (A) Curva generalizada de secagem do resíduo de soja fermentado. (B) Curva normalizada de taxa de secagem do resíduo de soja fermentado.

Os parâmetros para o ajuste de cada modelo aos dados experimentais foram dispostos nas Tabelas 6 e 7 para Page (1949) e Hodges (1982), respectivamente, para ambas as temperaturas de secagem juntamente com seus parâmetros estatísticos para verificação da qualidade do ajuste dos modelos.

Tabela 6: Parâmetros dos modelos e estatísticos para CGS.

Parâmetros	Page (1949)	
	0,82 m/s	1,97 m/s
α_1	1,0780	1,1687
β_1	0,9107	0,6651
R^2	0,9912	0,9963
χ^2	$5,75 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$

Tabela 7: Parâmetros dos modelos e estatísticos para TSN.

Hodges (1982)		
Parâmetros	0,82 m/s	1,97 m/s
α_2	0,5198	0,4081
β_2	1,6772	2,9127
R^2	0,9712	0,9783
χ^2	0,0020	$9,37 \cdot 10^{-4}$

A partir das Tabelas 6 e 7, observou-se que os modelos de Page (1949) e Hodges (1982) apresentaram coeficientes de correlação próximos à unidade e baixos valores de chi-quadrado reduzido para ambas as velocidades de secagem utilizadas. Assim, define-se que a curva generalizada de secagem e a normalização de taxa de secagem são capazes de descrever a cinética do processo para a faixa de temperatura entre 50 e 70 °C para o resíduo de soja fermentado (Diório; Pereira, 2014).

Difusividade e Energia de Ativação

O valor do coeficiente de difusividade da difusão da água no interior do resíduo de soja fermentado foi determinado para cada temperatura e velocidades utilizadas durante o processo de secagem e encontram-se na Tabela 7 juntamente com o valor do R^2 .

Tabela 7: Coeficiente de difusividade da umidade no interior do resíduo de soja fermentado seco nas temperaturas de 50 a 70 °C para as velocidades de 0,82 e 1,97 m/s.

Velocidade (m/s)	T (°C)	D (m ² s ⁻¹)	R ²
0,82	50	$6,62 \times 10^{-7}$	0,9498
	60	$6,04 \times 10^{-7}$	0,9751
	70	$6,78 \times 10^{-7}$	0,9807
1,97	50	$6,35 \times 10^{-7}$	0,9713
	60	$1,12 \times 10^{-6}$	0,9809
	70	$1,26 \times 10^{-6}$	0,9481

A Tabela 7 mostrou um aumento da difusividade em relação ao aumento da temperatura e da velocidade, o que condiz com a literatura (Botelho *et. al.*, 2018) e o valor médio do coeficiente de difusividade foi de $6,48 \cdot 10^{-7}$ e $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as secagens a 0,82 e 1,97 m/s, respectivamente.

A energia de ativação para a difusão da água foi determinada por meio da regressão linear de uma equação-tipo Arrhenius por meio do ajuste do logaritmo natural da difusividade e o inverso da temperatura conforme apresentado na Figura 7 para a velocidade de 0,82 m/s e na Figura 8 para 1,97 m/s.

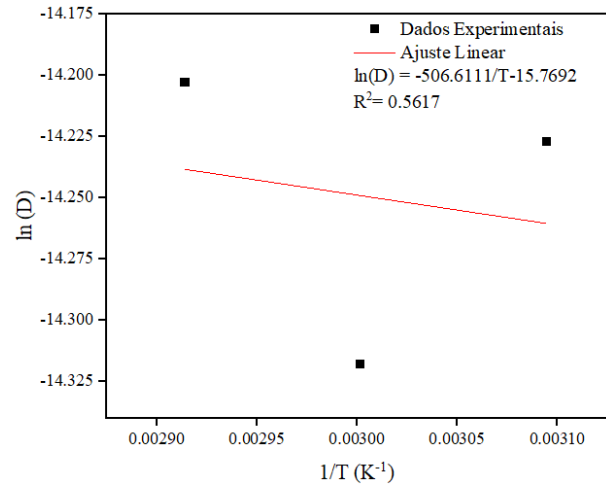


Figura 7: Relação da difusividade com a temperatura para a secagem a 0,82 m/s.

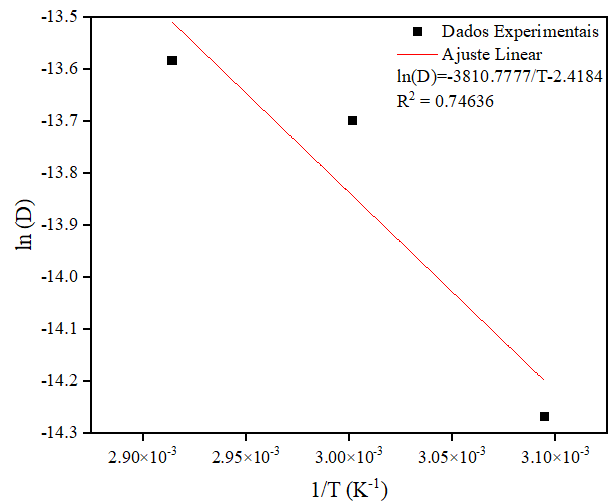


Figura 8: Relação da difusividade com a temperatura para a velocidade 1,97.

A partir da Figura 7 foi determinado um fator pré-exponencial, D_0 , de aproximadamente $1,42 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para a secagem a 0,82 m/s e, pela Figura 8, determinou-se para a velocidade de 1,97 m/s o mesmo fator D_0 de aproximadamente $0,0891 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esses resultados representam o valor que a difusividade adquire quando a tende ao infinito. Além disso, a energia de ativação para um mol de água em difusão no interior do resíduo

durante sua secagem foi estimada em 4,21 kJ mol⁻¹ para a secagem a 0,82 m/s e 31,68 kJ.mol⁻¹ para a velocidade de secagem de 1,97 m/s. Para a velocidade menor, a energia de ativação foi, aproximadamente, quatro vezes menor que o valor médio obtido por Botelho *et. al.* (2018) durante o estudo da cinética de secagem do grão de soja, enquanto para a maior velocidade o valor encontrado foi o dobro.

CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi realizar a secagem do resíduo de soja fermentado com ar nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C e nas velocidades de 0,82 m/s e 1,97 m/s e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais. O tempo de secagem variou entre 48 e 98 min. O período de taxa de secagem foi decrescente para ambas as velocidades de ar e, dessa forma, a umidade presente no resíduo analisado é inferior que o teor de umidade crítico. Para a velocidade de 0,82 m/s, a taxa de secagem média foi 0,035 g_{H2O} g⁻¹_{sólido seco} min⁻¹, enquanto para a velocidade de 1,97 m/s, o valor médio foi 0,10 g_{H2O} g⁻¹_{sólido seco} min⁻¹. O valor médio do coeficiente de difusividade foi de 6,48 · 10⁻⁷ m²s⁻¹ e 1,01 · 10⁻⁶ m²s⁻¹ para as secagens a 0,82 e 1,97 m/s, respectivamente. Assim, observou-se que o melhor ajuste para a velocidade de 0,82 m/s foi o modelo de Henderson-Pabis e, para a velocidade de 1,97 m/s, o melhor modelo de melhor ajuste foi o Dois Termos. Ainda, a energia de ativação obtida foi 4,21 kJ mol⁻¹ para a secagem a 0,82 m/s e 31,68 kJ.mol⁻¹ para a velocidade de secagem de 1,97 m/s. Dessa maneira, concluiu-se que a melhor condição para a secagem do resíduo de soja fermentado foi a 70 °C com o ar a 1,97 m/s.

REFERÊNCIAS

- AOAC (2005), Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International. 18 ed., Gaithersburg.
- BATISTA, E. A. (2016), Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. *Comunicata Scientiae*, Porto Alegre, p. 1-8, 1 ago. TCC (Bacharelado) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande-PB.
- BORTOLAIA, L. A. (2011), Modelagem Matemática e Simulação do Processo de Secagem Artificial de Grãos de Soja em Secadores de Fluxo Contínuo. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br>. Acesso em: 6 jul. 2022.
- BOTELHO, F. M. HOSCHER, R. H. HAUTH, M. R. BOTELHO, S. de C. C. (2018) Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa-MG, v. 26, n. 1, p. 13-25. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1098726>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- BRUCE, D. M. (1985), Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 °C. *Journal of Agricultural Engineering Research*. v. 32, p. 337-347.
- CHEN, D.; ZHENG, Y.; ZHU, X. (2012), Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar saw dust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource Technology*. v. 107, p. 451-455.
- CRANK, J. (1975), *The mathematics of diffusion*, 2nd ed., Oxford University Press. ISBN: 0 19 853344 6.
- DIÓRIO, A.; PEREIRA, N. C. (2014) Estudo de Secagem do Bagaço de Cana de Açúcar para Aplicação como Adsorvente. Relatório (PIC) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR.
- DOYMAZ, I. (2007), Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. v. 78, p. 1291-1297. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047.
- FERREIRA, S. V. (2022), Cinética de secagem e caracterização física e química dos grãos de soja. 2022. TCC (Bacharelado) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde-GO. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br>. Acesso em: 6 jul. 2022.
- HENDERSON, S. M. (1974), Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC*, v. 17, p. 1167-1172.
- HII, C. L.; LAW, C. L.; CLOKE, M. (2009), Modelling using a new thin layer drying

- model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*. v. 90, p. 191-198. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.022.
- HODGES, C. R. (1982) Laboratory drying study and applications for paper machine drying. *Proceedings of the Third International Drying Symposium*, Ashworth, J. C., University of Birmingham, England. p. 99-105.
- MARTINS, E. H. (2015), Aproveitamento do resíduo do processamento da soja para produção de painéis aglomerados. Orientador: Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Jataí-GO. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br>. Acesso em: 6 jul. 2022.
- MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. P.; BARROS, S. T. D. (2022) Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *Engvista*, v. 15, n. 2, p. 176-186.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. (2002) A new model for single-layer drying. *Drying Technology*. v. 20 (7), p. 1503-1513. DOI: 10.1081/DRT-120005864.
- MOTTA LIMA, O. C.; STENZEL, M.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. (2001) Secagem condutiva/convectiva de celulose fibra longa com ar ambiente em convecção forçada. *Acta Scientiarum*. v. 23, n. 6, p. 1389- 1399. DOI: 10.4025/actascitechnol.v23i0.2769.
- OLIVEIRA, C. G.; FOLETTTO, E. L.; ALVES, C. C. A.; MILANEZ, H.; PORTO, L. M. (2001) Influência da presença de umidade em um material adsorvente na cinética da clarificação do óleo de soja. *Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Florianópolis.
- PAGE, G. E. (1949), Factor influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA.
- RAHMAN, M. S.; PEREIRA, C. O.; THEBAND, C. (1998), Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International*. v. 30, p. 485-491. DOI: 10.1016/S0963-9969(98)00009-X.
- SANTOS, C. D. (2013) Avaliação das melhores condições de secagem de grãos de soja visando à manutenção do teor de proteínas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SANTOS, D. C. (2013), Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. *Comunicata Scientiae*, Porto Alegre, p. 1-8.
- TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. (2002) Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*. v. 55, p. 209-216. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00065-1.
- VEGA-GÁLVEZ, A.; NOTTE-CUELLO, E.; LEMUS-MONDACA, R.; ZURA, L. (2009), MIRANDA, M. Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Food and Bioprocess Processing*. v. 87, p. 254-260. DOI: 10.1016/j.fbp.2008.10.004.
- WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. (2007), Mathematical modelling on hot air-drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*. v. 40, p. 39-46. DOI: 10.1016/j.foodres.2006.07.017.
- YALDIZ, O.; EERTEKIN, C.; UZUN, H. I. (2001) Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. v. 26, p. 457-465. DOI: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4.