



## **SECAGEM DE RESÍDUO DE MILHO FERMENTADO: ESTUDO DE CASO NA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA**

LORENA CADAN<sup>1\*</sup>, ANA C. MEDEIROS<sup>1</sup>, ANNA C. L. GONÇALVES<sup>1</sup>, PAOLLA S. MELEGARI<sup>1</sup>, ALEXANDRE DIÓRIO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – PR  
\*e-mail: lorenacadan@gmail.com

**RESUMO** - O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes para o Brasil. A elevada produção leva à grande geração de resíduos e uma das maneiras de realizar seu reaproveitamento é utilizá-lo como adsorvente. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a secagem do resíduo de milho fermentado com ar nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e nas velocidades de 0,82 e 1,97 m/s e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais. Para todas as condições de secagem, o melhor ajuste foi o modelo Dois Termos. Houve aumento da difusividade em relação ao aumento da temperatura e da velocidade, e os valores médios desse parâmetro para as secagens a 0,82 e 1,97 m/s foram de, respectivamente,  $2,38 \times 10^{-7}$  e  $3,22 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. Ademais, a energia de ativação para um mol de água em difusão no interior do resíduo durante sua secagem foi de 13,14 kJ mol<sup>-1</sup> para 0,82 m/s e 31,35 kJ mol<sup>-1</sup> para 1,97 m/s. Dessa forma, concluiu-se que a melhor condição de secagem do material foi com ar na temperatura de 60 °C a 1,97 m/s.

### **INTRODUÇÃO**

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais importantes para o Brasil, podendo ser cultivado em diversas regiões do país. A estimativa nacional de área colhida para safra 2018/2019 foi de 17.254,8 mil hectares produzindo 98,5 milhões de toneladas. A semente de milho é o insumo com alto valor agregado, sua produção é realizada dentro de padrões rigorosos de qualidade, os quais, juntamente com práticas culturais (uso adequado de defensivos e fertilizantes), potencializam o desempenho no campo, maximizando a produtividade (de Araújo *et al.*, 2020).

A elevada produção de milho leva à grande geração de resíduo, como o sabugo, caule, palha e folhas. A produção de resíduos para cada tonelada de milho colhido é de 2,3 toneladas (Instituto Brasileiro das Indústrias de Pellets, Biomassa e Briquete, 2022). No ano de 2013, geraram-se 13,3 milhões de toneladas de resíduo no mundo para

uma produção mundial de 966 milhões de toneladas. O Brasil gerou 960 mil toneladas do resíduo em questão no mesmo ano (de Sales *et al.*, 2015).

Uma das formas de reaproveitamento do resíduo do milho é utilizá-lo como adsorvente. Por isso, faz-se necessário realizar a secagem dele, 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). Além disso, reduzir a composição de água do resíduo de milho aumenta a disponibilidade de sítios livres para a adsorção, aumentando a eficiência do processo (de Oliveira *et al.*, 2001).

O processo de desidratação dos grãos por evaporação é conhecido como secagem. 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 de massa (Bortolaia, 2011). Portanto, o objetivo do trabalho foi realizar a secagem do resíduo de milho fermentado com ar nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e nas velocidades de ar de 0,82 e 1,97 m/s, além de ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

O resíduo de milho fermentado utilizado foi fornecido pela COCAMAR, cooperativa agroindustrial localizada em Maringá-PR. O resíduo foi gerado após o processo de triadeira.

### Métodos

Determinação da umidade inicial: A umidade inicial do resíduo do milho foi determinada por meio do método gravimétrico (AOAC, 2005). Para isso, 4 g do material foram colocadas em uma estufa (Fanem 315 SE) a  $105 \pm 2$  °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 delgada: A secagem em camada fina do resíduo de milho ocorreu em um secador convectivo de bancada com fluxo

transversal dispondo uma camada fina de 100 g do material em uma peneira. O equipamento possui um soprador de ar com ajuste de velocidade. Além disso, o ajuste da temperatura do ar de secagem ocorre por meio de 4 resistências elétricas controladas por um reostato. O processo de secagem foi conduzido nas temperaturas de 40, 50, 60 °C  $\pm$  2 °C medidas com um termopar. 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 e a cada hora após 4 h 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.

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 ( $\chi^2$ ).

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)
$X_{adm} = a_4 \cdot \exp(-k_6 \cdot t) + b_3 \cdot \exp(-k_7 \cdot t)$	DT	Rahman <i>et al.</i> (1998); Togrul and Pehlivan (2002)	(8)

Le: Lewis; Pa: Page; HP: Henderson-Pabis; LN: Logarithmic; MK: Midili-Kucuk; DT: Dois Termos.

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 ( $\tau$ ) definido na Equação 11.

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

Em que  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  são os parâmetros do modelo a serem estimados.

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

Em que  $R_{max}$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 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  $\alpha_2$  e  $\beta_2$  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 ( $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}^{-1} \text{sólido seco min}^{-1}$ );  $D$  é o coeficiente de difusividade ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) 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 tenda a uma placa infinita e que o tempo de secagem seja longo. 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. Outra condição de uso dessa equação é que a resistência externa à transferência de massa seja desprezível, ou seja, com velocidades de ar acima de 1,5 m/s.

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

Em que  $\lambda$  é a inclinação (coeficiente angular),  $D$  é a difusividade efetiva e  $L$  é a metade da espessura do material submetido à secagem.

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.

$$D = D_0 \exp \left( \frac{-E_a}{R \cdot T} \right) \quad (16)$$

Em que  $D_0$  representa o fator pré-exponencial da equação-tipo Arrhenius ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );  $E_a$  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 ( $\text{kJ mol}^{-1}$ );  $R$  é a constante universal dos gases ( $8,314 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); e  $T$  é a temperatura absoluta (K).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Curvas de Secagem e de Taxa de Secagem

O resíduo de milho fermentado apresentou umidade inicial média de  $2,42 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ g}^{-1} \text{ sólido seco}$ . Esse valor é cerca de 7,6 vezes maior que a umidade inicial das espigas e sementes de milho, como exposto por de Araújo (2020). O teor elevado da umidade do resíduo em relação ao seu sabugo pode ser justificado pelas condições de armazenamento, visto que o resíduo se encontra disposto em local aberto, exposto às condições e variações climáticas.

As curvas de secagem do resíduo de milho nas diversas temperaturas avaliadas para as velocidades de 0,82 e 1,97 m/s estão expostas pelas Figuras 1 e 2, respectivamente. Vale ressaltar que as secagens foram realizadas com amostras diferentes em dias distintos, o que levou a diferentes valores de umidade inicial das amostras e de umidade relativa do ar ambiente.

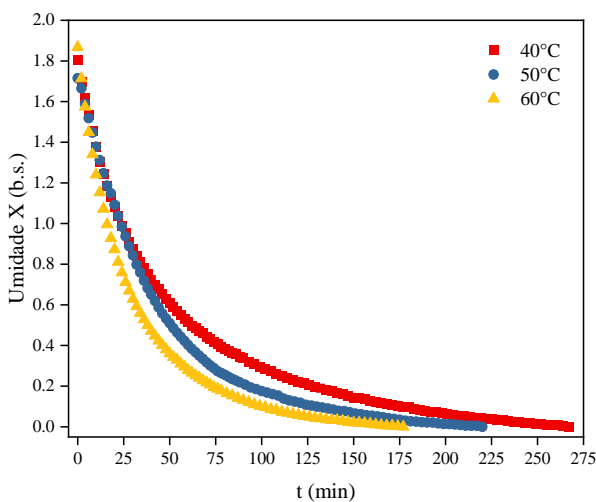


Figura 1: Curvas de secagem a 40, 50 e 60 °C do resíduo a 0,82 m/s.

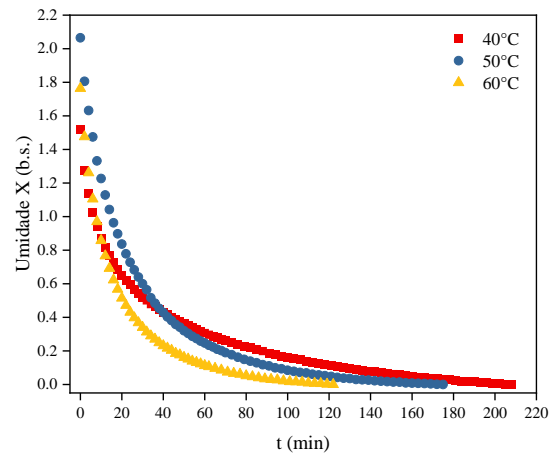


Figura 2: Curvas de secagem a 40, 50 e 60 °C do resíduo a 1,97 m/s.

A análise das figuras expôs que a umidade de equilíbrio atingida após a secagem foi, em média, de  $0,004 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ g}^{-1} \text{ sólido seco}$  para a temperatura de 40 °C,  $0,003 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ g}^{-1} \text{ sólido seco}$  para 50 °C e  $0,002 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ g}^{-1} \text{ sólido seco}$  para 60 °C. Além disso, observou-se que o tempo necessário para o processo de secagem à velocidade de 0,82 m/s foi maior em relação à velocidade de 1,97 m/s, chegando ao tempo máximo de secagem de 267 min para a temperatura de 40 °C, enquanto, para a mesma temperatura à velocidade superior, o tempo de secagem foi de 208 min. Como o aumento da temperatura resulta numa maior transferência de massa e diminui a umidade de equilíbrio dinâmico e o tempo de secagem, o resultado condiz com o esperado (Santos, 2014).

Apresentam-se, na Figura 3, as curvas de taxas de secagem nas temperaturas e velocidades avaliadas.

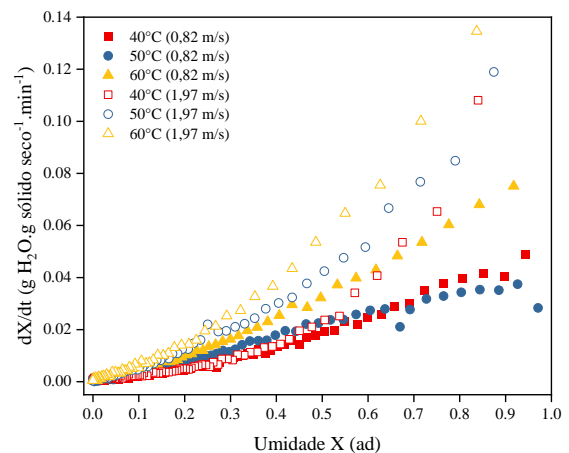


Figura 3: Taxas de secagem do resíduo de milho fermentado nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C a 0,82 e 1,97 m/s.

Nota-se, pela Figura 3, 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. Isso indica que a umidade presente no resíduo analisado já é inferior que o teor de umidade crítico (Santos, 2013). A figura em questão mostra, ainda, que o mecanismo físico dominante no movimento da umidade é a difusão (Menezes *et al.*, 2022). A taxa de secagem para a velocidade de 0,82 m/s variou entre 0,03 e 0,08  $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}^{-1} \text{sólido seco min}^{-1}$ , aproximadamente, a qual foi menor quando

comparada à taxa para a velocidade de 1,97 m/s. Esta velocidade apresentou variação entre 0,11 e 0,14  $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}} \text{g}^{-1} \text{sólido seco min}^{-1}$ .

### Modelagem da Secagem do Resíduo de Milho Fermentado

O ajuste dos modelos de secagem 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. Para mais fácil visualização, os melhores ajustes, ou seja, com maior  $R^2$  e menor  $\chi^2$ , foram assinalados em negrito.

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

T (°C)	40		50		60	
Eq.	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
(3)	0,98311	$9,83 \times 10^{-4}$	0,99894	$7,52 \times 10^{-5}$	0,99163	$4,90 \times 10^{-4}$
(4)	0,99878	$7,12 \times 10^{-5}$	0,99894	$7,58 \times 10^{-5}$	0,99948	$3,02 \times 10^{-5}$
(5)	0,99895	$6,10 \times 10^{-5}$	0,9992	$5,71 \times 10^{-5}$	0,99957	$2,50 \times 10^{-5}$
(6)	0,9936	$3,72 \times 10^{-4}$	0,99935	$4,62 \times 10^{-5}$	0,99655	$2,02 \times 10^{-5}$
(7)	0,59371	0,02366	0,57064	0,0306	0,48162	0,03037
(8)	<b>0,9996</b>	<b><math>2,34 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,99946</b>	<b><math>3,86 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,99988</b>	<b><math>7,02 \times 10^{-6}</math></b>

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

T (°C)	40		50		60	
Eq.	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$	R <sup>2</sup>	$\chi^2$
(3)	0,90769	0,004	0,98269	$9,01 \times 10^{-4}$	0,97727	0,00117
(4)	0,99666	$1,44 \times 10^{-4}$	0,99974	$1,37 \times 10^{-5}$	0,99932	$3,51 \times 10^{-5}$
(5)	0,99665	$1,45 \times 10^{-4}$	0,99975	$1,29 \times 10^{-5}$	0,99936	$3,29 \times 10^{-5}$
(6)	0,97239	0,0012	0,99386	$3,20 \times 10^{-4}$	0,9908	$4,73 \times 10^{-4}$
(7)	0,49845	0,02172	0,42648	0,02989	0,3297	0,03452
(8)	<b>0,99905</b>	<b><math>4,10 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,99978</b>	<b><math>1,16 \times 10^{-5}</math></b>	<b>0,99986</b>	<b><math>7,12 \times 10^{-6}</math></b>

As Tabelas 2 e 3 revelaram que, em ambas as velocidades e para todas as temperaturas, dos seis modelos analisados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais de secagem do resíduo de milho fermentado foi o modelo Dois Termos. As curvas ajustadas desse modelo foram apresentadas na Figura 4 para a velocidade de 0,82 m/s e na Figura 5 para a velocidade de 1,97 m/s, e seus parâmetros para cada temperatura foram dispostos na Tabela 4 para a menor velocidade e na Tabela 5 para a maior velocidade.

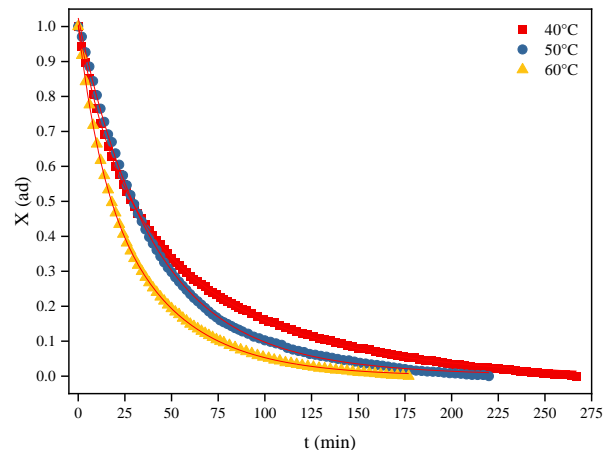


Figura 4: Ajuste do modelo Dois Termos aos dados de secagem a 0,82 m/s do resíduo de milho fermentado.

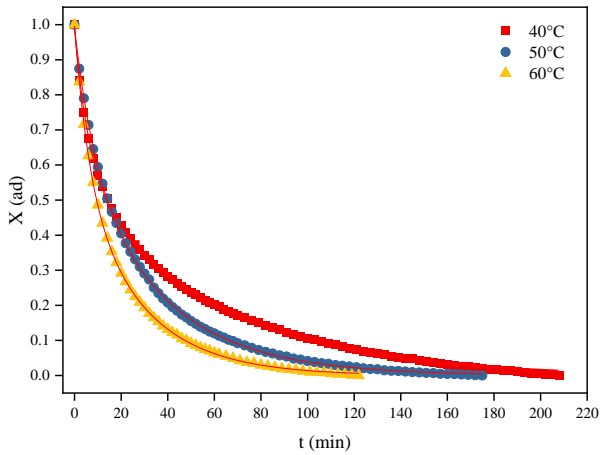


Figura 5: Ajuste do modelo Dois Termos aos dados de secagem a 1,97 m/s do resíduo de milho fermentado.

Tabela 4: Parâmetros ajustados do modelo Dois Termos para a secagem do resíduo de milho fermentado a 40, 50 e 60 °C a 0,82 m/s

T (°C)	a <sub>4</sub>	k <sub>6</sub>	b <sub>3</sub>	k <sub>7</sub>
40	0,6615	0,0143	0,3438	0,0604
50	0,1366	0,0131	0,8879	0,0268
60	0,6750	0,0254	0,3273	0,0851

Tabela 5: Parâmetros ajustados do modelo "Two Terms" para a secagem do resíduo de milho fermentado a 40, 50 e 60 °C a 1,97 m/s

T (°C)	a <sub>4</sub>	k <sub>6</sub>	b <sub>3</sub>	k <sub>7</sub>
40	0,5792	0,0175	0,4079	0,1584
50	0,6431	0,0280	0,3477	0,1166
60	0,5824	0,0372	0,4141	0,1602

### CGS e TSN

Os ajustes CGS e TSN foram feitos aos dados experimentais de secagem nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C para as duas velocidades. Isso possibilitou a representação de seus fenômenos em qualquer uma das três temperaturas. Essas curvas foram apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

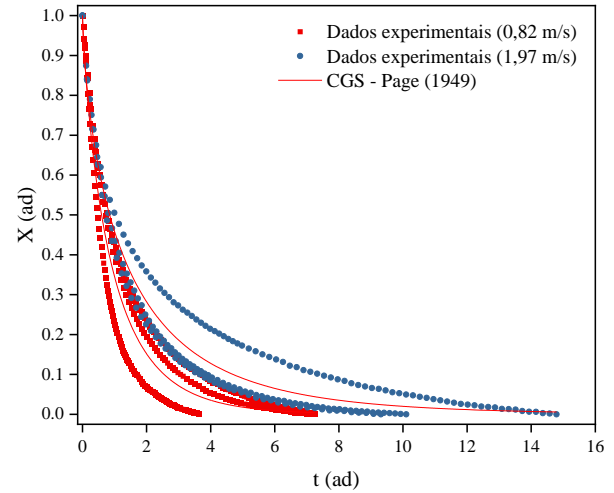


Figura 6: Curva generalizada de secagem do resíduo de milho fermentado.

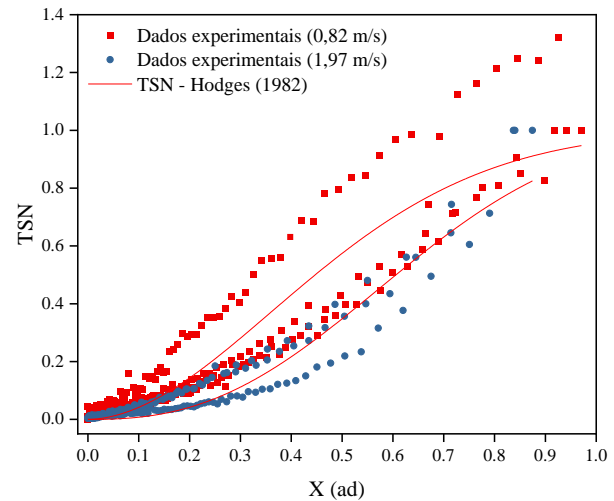


Figura 7: Curva normalizada de taxa de secagem do resíduo de milho fermentado.

Na Tabela 6, foram dispostos os parâmetros para o ajuste de cada modelo aos dados experimentais para ambas as velocidades de secagem, juntamente com seus parâmetros estatísticos para verificação da qualidade do ajuste dos modelos.

Tabela 6: Parâmetros dos modelos e estatísticos para a CGS e TSN

Parâmetros	Page (1949)		Hodges (1982)		
	0,82 m/s	1,97 m/s	0,82 m/s	1,97 m/s	
$\alpha_1$	1,06298	0,77852	$\alpha_2$	0,54431	0,70116
$\beta_1$	0,82644	0,70082	$\beta_2$	1,86267	2,51277
$R^2$	0,93806	0,9567	$R^2$	0,87004	0,91899
$\chi^2$	0,00386	0,00207	$\chi^2$	0,01085	0,00248

A partir da Tabela 6, observou-se que o modelo de Page (1949), quando comparado ao modelo de Hodges (1982), apresentou coeficientes de correlação mais próximos à unidade e menores valores de chi-quadrado reduzido para ambas as velocidades de secagem utilizadas. Assim, define-se que a curva generalizada de secagem descreve melhor a cinética do processo para a faixa de temperatura entre 40 e 60 °C para o resíduo de milho fermentado do que a normalização de taxa de secagem (Diório; Pereira, 2014).

### Difusividade e Energia de Ativação

Determinou-se, para cada temperatura e velocidade utilizadas durante o processo de secagem, o valor do coeficiente de difusividade da difusão da água no interior do resíduo de milho fermentado. Esses valores, juntamente com o parâmetro estatístico  $R^2$ , encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7: Coeficiente de difusividade da unidade no interior do resíduo de milho fermentado seco nas temperaturas de 40 a 60 °C para as velocidades de 0,82 e 1,97 m/s

Velocidade (m/s)	T (°C)	D (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
0,82	40	$1,77 \times 10^{-7}$	0,9691
	50	$3,07 \times 10^{-7}$	0,9838
	60	$2,38 \times 10^{-7}$	0,9795
1,97	40	$2,19 \times 10^{-7}$	0,9507
	50	$3,22 \times 10^{-7}$	0,9808
	60	$4,51 \times 10^{-7}$	0,9759

A Tabela 7 mostrou, em geral, um aumento da difusividade em relação ao aumento da temperatura e da velocidade, o que condiz com a literatura (Botelho *et al.*, 2018). O valor de difusividade para a secagem com ar na velocidade de 0,82 m/s a 50 °C foi maior que a difusividade com ar a 60 °C na mesma velocidade devido à limitação da Equação 15 utilizada para o cálculo, já que essa velocidade é menor que 1,5 m/s. Apesar disso, foi possível determinar os valores médios dos coeficientes de difusividade para as secagens a 0,82 e 1,97 m/s, os quais foram de, respectivamente,  $2,38 \times 10^{-7}$  e  $3,22 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

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.

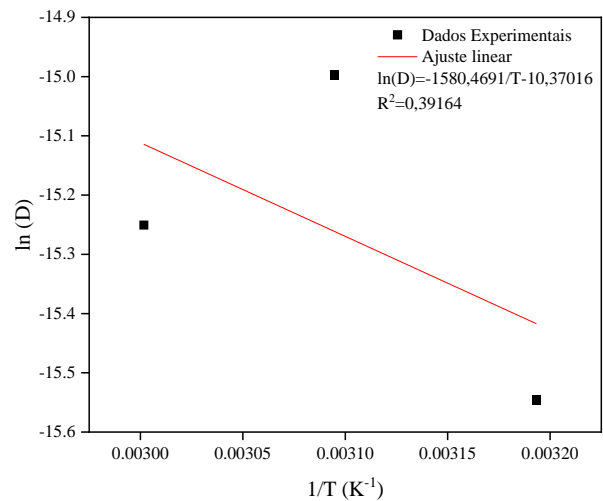


Figura 7: Relação da difusividade com a temperatura para a secagem a 0,82 m/s.

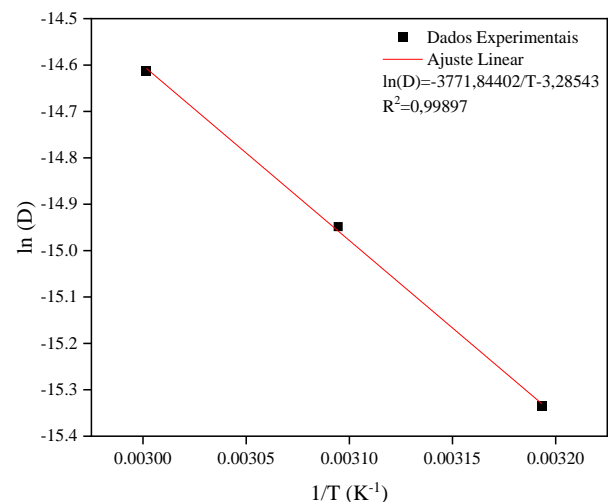


Figura 8: Relação da difusividade com a temperatura para a velocidade de 1,97 m/s.

A partir da Figura 7, foi determinado um fator pré-exponencial,  $D_0$ , de aproximadamente  $3,13 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> para a secagem a 0,82 m/s e, pela Figura 8, determinou-se o mesmo fator  $D_0$  de aproximadamente  $0,0374$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> para a velocidade de 1,97 m/s. Esses resultados representam o valor que a difusividade adquire quando a temperatura tende ao infinito. Ademais, a energia de ativação para um mol de água em difusão no interior do resíduo durante sua secagem foi estimada em 13,14 kJ mol<sup>-1</sup> para a secagem a 0,82 m/s e 31,35 kJ mol<sup>-1</sup> para a velocidade de secagem de 1,97 m/s. Para

aquela velocidade, a energia de ativação foi cerca de 30% menor que o valor médio de 19,09 kJ mol<sup>-1</sup> obtido por de Oliveira (2012) durante o estudo da cinética de secagem do grão de milho, enquanto que, para esta velocidade, o parâmetro em questão foi, aproximadamente, 60% maior. Não foram encontrados dados específicos para o resíduo de soja fermentado para fim de corroboração.

## CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo realizar a secagem do resíduo de milho fermentado com ar nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e nas velocidades de ar de 0,82 e 1,97 m/s e ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais. A partir da metodologia aplicada, foi observado que o resíduo possuiu elevada umidade, apresentando período de taxa de secagem decrescente para ambas as velocidades de ar. Assim, a difusão foi o mecanismo dominante, com valores médios do coeficiente de difusividade de, aproximadamente,  $2,38 \times 10^{-7}$  e  $3,22 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> para as velocidades de 0,82 e 1,97 m/s, respectivamente. Ademais, o modelo Dois Termos melhor descreveu a secagem do resíduo de milho fermentado e, pela primeira vez, estimou-se a energia de ativação da secagem deste material, com valor de, aproximadamente, 13,14 kJ mol<sup>-1</sup> para aquela velocidade e 31,35 kJ mol<sup>-1</sup> para esta. Logo, concluiu-se que a melhor condição de secagem do material foi com ar na temperatura de 60 °C a 1,97 m/s.

## REFERÊNCIAS

- AOAC (2005), Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International, Gaithersburg, Washington DC.
- SANTOS, D. C. *et al.* (2014), Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum, *Comunicata Scientiae*, Vol 5, p.75–82.
- BORTOLAIA, L. A. (2011), Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. PROMEC/UFRGS – Porto Alegre – RS, 148p. (tese de doutorado).
- BOTELHO, F. M. *et al.* (2018), Cinética de secagem de grãos de soja: Influência varietal, *Revista Engenharia na Agricultura*, Vol 26, p.13-25.
- BRUCE, D. M. (1985), Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 °C, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol 32, p.337-347.
- CHEN, D. *et al.* (2012), Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar saw dust by thermogravimetric analysis under isothermal condition, *Bioresource Technology*, Vol 107, p.451-455.
- CRANK, J. (1975), *The mathematics of diffusion*, Oxford University Press, London.
- DE ARAÚJO, L. L. *et al.* (2020), Caracterização e gerenciamento dos resíduos gerados no beneficiamento das sementes de milho, *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Vol 14, p.939–952.
- DE OLIVEIRA, C. G. *et al.* (2001), Influência da presença de umidade em um material adsorvente na cinética da clarificação do óleo de soja, *Anais do XLV CBC 2001 - Congresso Brasileiro de Cerâmica*, p.0305901-0305909, Florianópolis - SC.
- DE OLIVEIRA, D. E. C. *et al.* (2012), Cinética de secagem dos grãos de milho, *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Vol 11, p.190–201.
- DE SALES, P. F. *et al.* (2015), Produção, caracterização e aplicação do carvão ativado obtido a partir do sabugo de milho: A busca pelo reaproveitamento de um resíduo agroindustrial, *Revista Virtual de Química*, Vol 7, p.1174–1188.
- DIÓRIO, A.; PEREIRA, N. C. (2014), Estudo de Secagem do Bagaço de Cana de Açúcar para Aplicação como Adsorvente. DEQ/UEM, Maringá – PR. (relatório de iniciação científica).
- DOYMAZ, I. (2007), Air-drying characteristics of tomatoes, *Journal of Food Engineering*, Vol 78, p.1291-1297.
- FERREIRA, S. V. (2022), Cinética de secagem e caracterização física e química dos grãos de soja. IF GOIANO, Rio Verde –



- GO, 29p. (trabalho de conclusão de curso).
- HENDERSON, S. M. (1974), Progress in developing the thin layer drying equation, Transactions of ASAC, Vol 17, p.1167–1172.
- HIL, C. L. *et al.* (2009), Modelling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa, Journal of Food Engineering, Vol 90, p.191-198.
- HODGES, C. R. (1982), Laboratory drying study and applications for paper machine drying, Proceedings of the Third International Drying Symposium, p.99-105, University of Birmingham, England.
- INSTITUTO BRASILEIRO DAS INDÚSTRIAS DE PELLETS, BIOMASSA E BRIQUETE (2022), Biomassa Agroindustrial: Milho. In: Instituto Brasileiro Pellets Biomassa e Briquete: Biomassa. Disponível em: <https://abibbrasil.wixsite.com/institutobr pellets/biomassa-agorindustrial>. Acesso em: 7 jul. 2022.
- MENEZES, M. L. *et al.* (2022), Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo, Engevista, Vol 15, p.176-186.
- MIDILLI, A. *et al.* (2002), A new model for single-layer drying, Drying Technology, Vol 20, p.1503-1513.
- MOTTA LIMA, O. C. *et al.* (2001), Secagem condutiva/convectiva de celulose fibra longa com ar ambiente em convecção forçada, Acta Scientiarum, Vol 23, p.1389-1399.
- PAGE, G. E. (1949), Factor influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers. Department of Mechanical Engineering, Purdue University - Purdue, USA. (dissertação de mestrado).
- RAHMAN, M. S. *et al.* (1998), Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas, Food Research International, Vol 30, p.485-491.
- SANTOS, C. D. (2013), Avaliação das melhores condições de secagem de grãos de soja visando à manutenção do teor de proteínas. PPGEQ/UFRGS - Porto Alegre, RS, 65p. (dissertação de mestrado).
- TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. (2002), Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers, Journal of Food Engineering, Vol 55, p.209-216.
- VEGA-GÁLVEZ, A. *et al.* (2009), Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller), Food and Bioproducts Processing, Vol 87, p.254-260.
- WANG, Z. *et al.* (2007), Mathematical modelling on hot air-drying of thin layer apple pomace, Food Research International, Vol 40, p.39-46.
- YALDIZ, O. *et al.* (2001), Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, Energy, Vol 26, p.457-465.