

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE FOLHAS DE *PHORMIUM TENAX* PARA USO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Marina Borsuk Fogaça (UFPR) E-mail: marinaborsuk@hotmail.com
Talita Szlapak Franco (UFPR) E-mail: talitaszlapak@gmail.com
Thais H. S.Flores-Sahagun (UFPR) E-mail: tsydenstricker@gmail.com

Resumo: Compósitos poliméricos com reforço de fibras vegetais representam uma alternativa para o desenvolvimento de novos materiais que apresentam baixo custo e bom desempenho. Em escala industrial, a secagem artificial das fibras naturais previamente à sua incorporação à matriz polimérica torna-se, em muitos casos, indispensável. O estudo da cinética de secagem apresenta-se, dessa forma, como um elemento conveniente de investigação, pois revela importantes aspectos termodinâmicos relacionados ao material e às condições de secagem. No presente trabalho investigou-se a cinética de secagem de folhas de *Phormium tenax* a 70°C, 90°C e 100°C, para determinação de sua difusividade efetiva, energia de ativação e ajustes de modelos matemáticos aos dados experimentais. Os valores da difusividade efetiva resultantes foram de $1,1044 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $3,0295 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $5,08632 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para 70°C, 90°C e 100°C, respectivamente. A energia de ativação foi de 53,88 KJ/mol e o modelo matemático que melhor convergiu aos dados experimentais foi o Logarítmico, com $R^2=0,9999$ para todas as temperaturas estudadas. As amostras atingiram a umidade de equilíbrio aos 330 minutos, 150 minutos e 100 minutos, a 70°C, 90°C e 100°C, respectivamente. Considerando a secagem das folhas de *Phormium tenax* em uma unidade industrial, o tempo de 330min (5,5h) parece muito alto, podendo se tornar o gargalo da produção. Ao mesmo tempo, o aumento de apenas 20°C na temperatura de secagem reduz em 67% o tempo de secagem, no entanto, é importante avaliar a degradação das fibras através da termogravimetria.

Palavras-chave: Cinética de secagem, difusividade efetiva, energia de ativação, ajuste de modelos matemáticos.

STUDY OF DRYING KINETICS OF *PHORMIUM TENAX* LEAVES FOR USE IN POLYMERIC COMPOSITES

Abstract: Polymeric composites reinforced with vegetable fibers represent an alternative for the development of new materials that present low cost and good performance. On an industrial scale, the artificial drying of natural fibers prior to their incorporation into the polymeric matrix becomes, in many cases, indispensable. The study of drying kinetics thus represents a convenient element of investigation, as it reveals important thermodynamic aspects related to the material and the drying conditions. In the present work, the drying kinetics of *Phormium tenax* leaves at 70°C, 90°C and 100°C was investigated, in order to determine their effective diffusivity, activation energy and adjustment of the mathematical models with the experimental data. The resulting effective diffusivity values were $1.1044 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $3.0295 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ and $5.08632 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, for 70°C, 90°C and 100°C, respectively. The activation energy was 53.88 KJ/mol and the mathematical model that best converged to the experimental data was the Logarithmic, with $R^2=0.9999$ for all studied temperatures. The samples reached equilibrium humidity at 330 minutes, 150 minutes and 100 minutes, at 70°C, 90°C and 100°C, respectively. Considering the drying of the leaves of *Phormium tenax* in an industrial unit, the time of 330min (5.5h) seems very high, and can become the bottleneck of production. At the same time, the increase of just 20°C in the drying temperature reduces the drying time by 67%, however, in the future it is important to evaluate the degradation of the fibers through thermogravimetry.

Keywords: Drying kinetics, effective diffusivity, activation energy, adjustment of mathematical models.

1. Introdução

A necessidade de racionalizar custos e aumentar a produtividade, sem diminuir a qualidade dos produtos, tem motivado a substituição de peças metálicas por peças de

outros materiais, além de ampla aplicabilidade em embalagens, o que demonstra a relevância do uso industrial de polímeros (NAYANA; KANDASUBRAMANIAN, 2020).

Apesar de apresentar vantagens em relação aos metais, como menor peso, maior durabilidade, resistência à corrosão, alta resistividade elétrica e baixa condutividade térmica, restrições são observadas para polímeros submetidos a altas tensões mecânicas e/ou altas temperaturas de trabalho. Um reforço por adição de fibras, que dá origem a um material denominado compósito, pode proporcionar um aumento nas propriedades mecânicas da matriz polimérica à qual são adicionados, como o módulo de elasticidade e resistência à tração (VIGNESHWARAN et al., 2020; AHMAD et al., 2020).

Cargas de reforço de matéria orgânica representam uma alternativa para o desenvolvimento de materiais que atendam a determinadas especificações técnicas sem aumentar excessivamente os custos envolvidos em sua produção (THAKUR; THAKUR; KESSLER, 2017; GOBIKANNAN et al., 2020). Além disso, problemas ambientais gerados pelo acúmulo de polímeros derivados do petróleo podem ser amenizados com o uso de polímeros biodegradáveis. Uma alternativa para esse fim tem sido a incorporação de cargas biodegradáveis em matrizes poliméricas (VIGNESHWARAN et al., 2020).

Embora existam estudos sobre o desempenho do reforço de fibras, nanofibras e nanocristais da planta *Phormium tenax*, isso ainda é pouco explorado. Considerando o alto potencial de reforço das folhas de *Phormium tenax*, é importante que um estudo mais completo, incluindo a cinética de secagem, seja realizado. A *Phormium tenax* é uma planta perene, nativa da Nova Zelândia, Chile e Argentina, cujas folhas têm entre 6 e 10 cm de largura e comprimento entre 1,6 e 4,3 m, também conhecida como *harakeke* (FURTADO et al., 2020; FORTUNATI et al., 2013; SAMMARTINO et al., 2010).

A motivação para a aplicação das fibras de *Phormium tenax* como reforço em compósitos poliméricos decorre de suas propriedades mecânicas, que são promissoras, quando comparadas com fibras de outras plantas, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de *Phormium tenax* com diferentes comprimentos (20, 30 e 40 mm) e fibras de outras folhas

Fibra	Diâmetro (μm)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Alongamento à fratura (%)
<i>Phormium tenax</i> 20	104,48 \pm 23,18	770,68 \pm 320,52	23,89 \pm 9,45	5,04 \pm 0,8
<i>Phormium tenax</i> 30	135,56 \pm 37,36	579,67 \pm 286,96	27,22 \pm 10,51	3,25 \pm 0,99
<i>Phormium tenax</i> 40	120,39 \pm 26,37	465,96 \pm 214,72	27,59 \pm 12,06	2,26 \pm 0,2
Abacaxi	20 – 80	413 – 1627	34,5 – 82,5	1,6
Sisal	50 – 200	486 – 640	9,4 – 22,0	3 – 7
Abaca	122	756	31,1	2,9
Curauá	66	913	30	3,9
Henequén	8 – 33	500 \pm 70	13,2 \pm 3,1	4,8 \pm 1,1
Fique	50 – 200	200	8 – 12	4 – 6
Banana	50 – 250	760	30,06	2,7 – 3,5

Fonte: Adaptado de Rosa et al. (2010)

Antes da incorporação de fibras vegetais à matriz polimérica, em escala industrial ou laboratorial, a secagem artificial é na maior parte das vezes indispensável, não apenas pelo volume de materiais empregados, mas também pelo tempo de secagem, que pode

ser abreviado, em comparação ao tempo de secagem natural (AGHBASHLO et al., 2013).

Durante a secagem, ocorrem dois fenômenos de transferência, que são a transferência de calor da fonte de aquecimento para o material e a transferência de massa da umidade do interior do material, primeiro para a sua superfície, e em seguida, para a sua vizinhança (DESA et al., 2019). A difusão configura-se como o principal mecanismo dessa remoção de umidade (ONWUDE et al., 2018). O estudo da cinética de secagem apresenta-se, dessa forma, como um elemento conveniente de investigação, pois revela importantes aspectos termodinâmicos relacionados ao material e às condições de secagem.

A difusividade efetiva representa a capacidade de transferência de massa (de água) do material para o meio, e não é considerada uma propriedade intrínseca do material, uma vez que depende das condições operacionais do processo de secagem, tais como vazão do ar e temperatura. Ressalta-se sua importância por possibilitar a determinação da energia de ativação do material (MENEZES et al., 2013). A energia de ativação corresponde à energia mínima necessária para que a secagem do material ocorra (ONWUDE et al., 2018).

Modelos matemáticos e empíricos, ainda que restritos às condições analisadas, não permitindo uma extrapolação além dessas condições, são ferramentas que auxiliam na predição do comportamento do material durante processos de secagem com elevada acurácia (MARTÍNEZ-MARTÍNEZ et al., 2015).

No presente trabalho investigou-se a cinética de secagem de folhas de *Phormium tenax* a 70°C, 90°C e 100°C, para determinação de sua difusividade efetiva, energia de ativação e ajustes de modelos matemáticos aos dados experimentais. Em processos de secagem de fibras vegetais em escala industrial, é importante avaliar as condições de secagem mais econômicas, considerando todo o processo, ou seja, o tempo total de secagem e a energia gasta durante o processo.

2. Materiais e métodos

As folhas de *Phormium tenax* foram colhidas no município de Quatro Barras/PR, cortadas em quadrados de aproximadamente 5x5 cm, e secadas em uma estufa de secagem com circulação e renovação de ar, com sistema de convecção mecânica de ar forçado no sentido horizontal, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

O teor médio de umidade inicial das folhas de *Phormium tenax* foi determinado pelo método de secagem em estufa a 105°C±3°C durante 24 horas (AMERI et al., 2020, VIMERCATI et al., 2020). As massas inicial ($m_{úmida}$) e final (m_{seca}) das amostras foram determinadas, e dessa forma a umidade inicial foi obtida por meio da Equação 1.

$$X_0 = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (1)$$

As temperaturas selecionadas para o processo de secagem foram de 70°C±2°C, 90°C±2°C e 100°C±2°C, com fluxo de ar constante. A massa inicial total das amostras para cada temperatura foi de 50g±0,3g. Foram realizadas pesagens periódicas em balança eletrônica digital com precisão de 0,01g, em intervalos de 5 minutos, até se obter massa constante.

A razão de umidade (ou valor adimensional do teor de umidade) foi determinada pela Equação 2, segundo ONWUD et al. (2017):

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2)$$

sendo X_t , X_e e X_0 os teores de umidade para cada tempo de pesagem, tempo inicial e de equilíbrio, respectivamente.

A difusividade efetiva da umidade das folhas de *Phormium tenax* foi determinada para cada processo de secagem, ajustando-se os dados experimentais ao modelo da difusão líquida com aproximação por três termos (Equação 3), que assume ausência de resistência térmica e distribuição inicial uniforme da água. Esta equação consiste na solução analítica para a Segunda Lei de Fick, considerando-se a forma geométrica do material estudado aproximado a uma placa plana (AMERI et al., 2020; MARTÍN-GÓMEZ et al., 2018).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (3)$$

sendo D_{ef} , n , t e L , respectivamente a difusividade efetiva, um inteiro positivo, o tempo, e o comprimento característico (que no presente trabalho corresponde à metade da espessura da amostra – 0,5mm). Para tempos longos de secagem, tendo-se $RU < 0,6$, a Equação 3 pode ser reduzida ao primeiro termo da série:

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

Ao linearizar-se a Equação 4, e plotar-se $\ln(RU)$ em função do tempo para cada condição de secagem, a inclinação da regressão linear (α) permite o cálculo de D_{ef} , conforme a Equação 5.

$$\alpha = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (5)$$

A energia de ativação do processo de secagem é dada pela Equação de Arrhenius (Equação 6), que relaciona a difusividade efetiva à temperatura (AMERI et al., 2020; KOUKOUCH et al., 2017).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6)$$

sendo D_0 , E_a , R e T o fator de Arrhenius (m^2s^{-1}), a energia de ativação (Jmol^{-1}), a constante universal dos gases ($9,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) e a temperatura absoluta (K).

Reescrevendo-se a Equação 6 aplicando-se o logaritmo natural de ambos os lados, tem-se:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT} \quad (7)$$

Plotando-se $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura absoluta, considerando-se todos os processos de secagem (a 70°C , 90°C e 100°C), a inclinação da regressão linear fornece $-E_a/R$.

Os modelos matemáticos para estimativa de curvas de secagem, de Newton Lewis (Equação 8), Page (Equação 9), Henderson e Pabis (Equação 10) e Logarítmico (Equação 11) (VIMERCATI et al., 2018; HORUZ et al., 2017).

$$RU = \exp(-kt) \quad (8)$$

$$RU = \exp(-kt^n) \quad (9)$$

$$RU = a \exp(-kt) \quad (10)$$

$$RU = a \exp(-kt) + bt \quad (11)$$

sendo t o tempo de secagem, a e b coeficientes dos modelos, e k e n constantes de secagem.

3. Resultados e discussão

Considerando que a difusão da umidade do material é favorecida pelo aumento da temperatura, foi observado o aumento da difusividade efetiva com a elevação da temperatura (Figura 1. Os valores de D_{ef} resultantes foram $1,1044 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $3,0295 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $5,08632 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para 70°C , 90°C e 100°C , respectivamente.

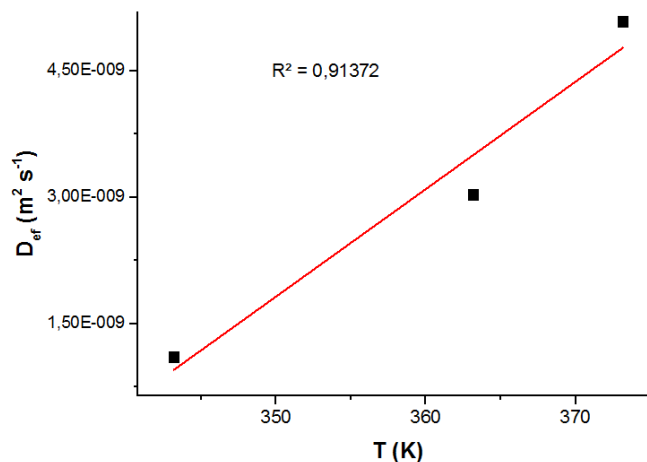


Figura 1 – Efeito da temperatura na difusividade efetiva

A Figura 2 apresenta $\ln(D_{ef})$ em função do inverso da temperatura absoluta; a inclinação desta regressão linear, com $R^2 = 0,99854$, representa a razão entre a energia de ativação (E_a) e a constante universal dos gases (R).

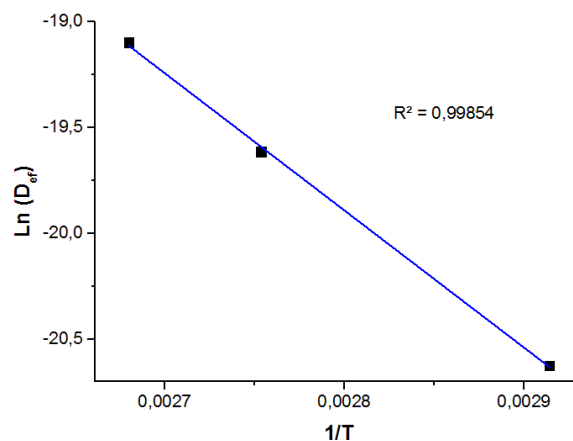


Figura 2 – Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura de secagem de folhas de *Phormium tenax*

A energia de ativação das folhas de *Phormium tenax* foi de 53,88 KJ/mol, que pode ser considerada em concordância com dados da literatura, comparando-a à de outros materiais de origem vegetal apresentados na Tabela 2. Com base no seu valor de energia de ativação, próxima à dos grãos de urucum e da uva, infere-se que a *Phormium tenax* é muito mais difícil de secar do que fatias de maçã, por exemplo. Isto significa que, caso se optasse pela secagem natural ao sol, o tempo para sua secagem completa seria consideravelmente maior.

Tabela 2 – Energia de ativação (E_a) para secagem de diversos materiais

Material	E_a (kJ/mol)	Referências
Bagaço de maracujá-amarelo	7,76 – 11,14	Menezes et al. (2013)
Batata doce	11,18 – 36,44	Onwude et al. (2017)
Fatias de maçã	13,04 – 33,52	Horuz et al. (2017)
Pasta enriquecida com espinafre	19,34	Vimercati et al. (2020)
Mandioca	22,915 – 27,17	Kosasih et al. (2020)
Sementes de <i>Cassia fistula</i>	25,72 – 38,73	Sahoo et al. (2020)
Bagaço de azeitona	29,06	Koukouch et al. (2017)
Sementes de <i>Albizia lebbek</i>	30,14 – 42,95	Sahoo et al. (2020)
Folhas de <i>Lippia alba</i> brasileira	31,79	Barbosa et al. (2007)
Sementes de <i>Putranjiva roxburghii</i>	34,46 – 56,26	Sahoo et al. (2020)
Folhas de <i>Phormium tenax</i>	53,88	Presente trabalho
Uva	54,43 – 56,49	Martín-Gómez et al. (2019)
Grãos residuais de urucum	58,95 – 70,56	Santos et al. (2014)

Quanto aos ajustes dos modelos matemáticos, os coeficientes (a , b) e as constantes de secagem (k , n) foram determinadas por meio do *software* Origin® 2016, em ajuste não linear, com Regressão de Distância Ortogonal como algoritmo de iteração. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos ajustados para a secagem de folhas de *Phormium tenax* em diferentes temperaturas

Modelo	Parâmetro	Temperatura (°C)		
		70	90	100
Newton Lewis	k	0,00796	0,02119	0,03345
	R ²	0,98623	0,98973	0,98069
	χ ²	0,00108	8,97165×10 ⁻⁴	0,00197
Page	k	0,0042	0,01152	0,1098
	n	1,12845	1,15015	1,30912
	R ²	0,99164	0,9957	0,99858
	χ ²	6,5541×10 ⁻⁴	3,76007×10 ⁻⁴	1,45328×10 ⁻⁴
Henderson e Pabis	a	1,0251	1,03382	1,07518
	k	0,00816	0,02188	0,03573
	R ²	0,98685	0,9907	0,98556
	χ ²	0,00103	8,11961×10 ⁻⁴	0,00147
Logarítmico	a	0,97567	1,00042	1,04743
	b	-3,72717×10 ⁻⁴	-5,251×10 ⁻⁴	-7,05781×10 ⁻⁴
	k	0,00631	0,01868	0,03129
	R ²	0,99999	0,99999	0,99999
	χ ²	4,84889×10 ⁻⁵	7,66204×10 ⁻⁵	5,75588×10 ⁻⁵

Percebe-se, por meio da Tabela 3, que o modelo de maior convergência com os dados experimentais foi o Logarítmico, com R² = 0,9999 para todas as temperaturas, e com os menores valores de χ², sendo este o modelo que melhor representa a cinética de secagem das folhas de *Phormium tenax* nas condições estudadas.

A Figura 3 apresenta as curvas de secagem experimentais e ajustadas aos modelos matemáticos, e exibem a relação entre a razão de umidade e o tempo de secagem; permitem a observação do mecanismo de remoção de umidade, uma vez que se percebe diminuição do teor de água com o aumento do tempo de exposição do material à passagem de ar aquecido.

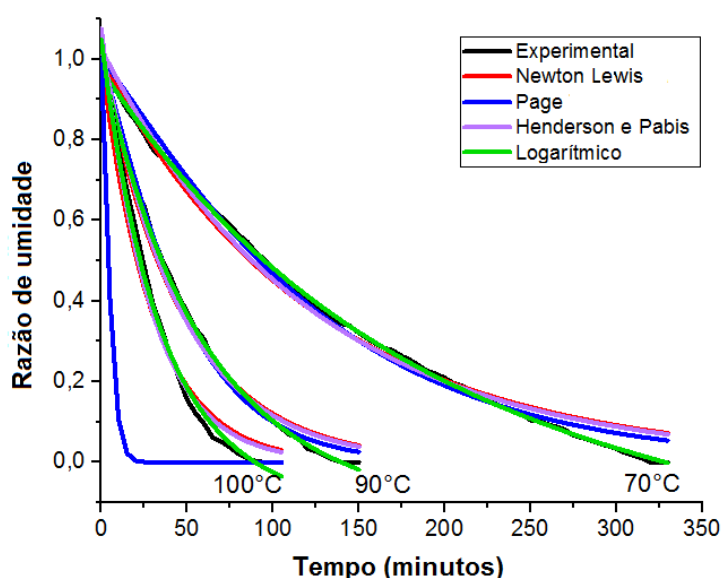


Figura 3 – Curvas de secagem de folhas de *Phormium tenax* em diferentes temperaturas

Conforme se observa na Figura 3, as amostras atingiram a umidade de equilíbrio aos 330 minutos, 150 minutos e 100 minutos, a 70°C, 90°C e 100°C, respectivamente.

Considerando a secagem das folhas de *Phormium tenax* em uma unidade industrial, o tempo de 330min (5,5h) parece muito alto, podendo se tornar o gargalo da produção. Ao mesmo tempo, o aumento de apenas 20°C na temperatura de secagem reduz em 67% o tempo de secagem. No entanto, é importante avaliar a degradação das fibras, o que pode ser avaliado em trabalhos futuros através da termogravimetria. Quanto ao ajuste dos modelos matemáticos, o modelo de Page para a temperatura de 100°C, embora tenha apresentado $R^2 = 0,99858$, não convergiu adequadamente com os resultados experimentais, podendo ser descartado para esta condição específica, uma vez que estes modelos empíricos, apesar de sua grande utilidade, não explicam nem preveem a distribuição de umidade no interior do material. Os demais modelos são aplicáveis à secagem de *Phormium tenax* para as três temperaturas consideradas.

4. Conclusões

Verificou-se o aumento da difusividade efetiva com a elevação da temperatura, já que a difusão da umidade do material é favorecida pelo aumento da temperatura. Os valores de D_{ef} resultantes foram $1,1044 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, $3,0295 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ e $5,08632 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, para 70°C, 90°C e 100°C, respectivamente. A energia de ativação das folhas de *Phormium tenax* foi de 53,88 KJ/mol, que pode ser considerada em concordância com dados da literatura, em comparação à de outros materiais de origem vegetal. A relativa alta energia de ativação encontrada sugere que a *Phormium tenax* é um material relativamente mais difícil de ser secado, o que mostra que a retirada de umidade em estufas é essencial para processos industriais.

A amostra atingiu a umidade de equilíbrio aos 330 minutos, 150 minutos e 100 minutos, a 70°C, 90°C e 100°C, respectivamente. Quanto ao ajuste dos modelos matemáticos, o modelo de Page para a temperatura de 100°C, embora tenha apresentado $R^2 = 0,99858$, não convergiu adequadamente com os resultados experimentais. O modelo de maior convergência com os dados experimentais foi o Logarítmico, com $R^2 = 0,9999$ para todas as temperaturas, e com os menores valores de χ^2 , sendo este o modelo que melhor representa a cinética de secagem das folhas de *Phormium tenax* nas condições estudadas.

O estudo preliminar sobre a secagem convectiva de folhas de *Phormium tenax*, realizado no presente trabalho, delineou uma melhor compreensão do comportamento desse material, possibilitando, para trabalhos futuros, um melhor controle, bem como a avaliação do consumo de energia elétrica nos processos de secagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de doutorado de Marina Borsuk Fogaça e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa DT da segunda autora.

Referências

AHMAD, F.; YUVARAJ, N. & BAJPAI, P. K. *Effect of reinforcement architecture on the macroscopic mechanical properties of fiberous polymer composites: a review*. Polymer Composites. V. 41, n. 6, p. 2518-2534, 2020.

AMERI, B.; HANINI, S. & BOUMAHDI, M. *Influence of drying methods on the thermodynamic*

parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. *Renewable Energy*. V. 147, p. 1107-1119, 2020.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L. & GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thinlayer drying of brazilian lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (mill) n.e. brown). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. V.9, n.1, p.73-82, 2007.

DESA, W. N. M.; MOHAMMAD, M. & FUDHOLI, A. Review of drying technology of fig. *Trends in Food Science & Technology*. V. 88, p. 93-103, 2019.

FORTUNATI, E.; PUGLIA, D.; MONTI, M.; PEPONI, L.; SANTULLI, C.; KENNY, J. M. & TORRE, L. Extraction of cellulose nanocrystals from *Phormium tenax* fibres. *Journal of Polymers and the Environment*. V. 21, p. 319-328, 2013.

FURTADO, F.; FLORES-SAHAGUN, T. H. S.; FRANCO, T. & CORRÊA, H. L. Caracterização da *Phormium tenax* para uso como reforço em compósito de polipropileno. Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

GOBIKANNAN, T.; BERIHUN, H.; AKLILU, E.; PAWAR, S. J.; AKELE, G.; AGAZIE, T. & BIHONEGN, S. Development and Characterization of Sisal Fiber and Wood Dust-Reinforced Polymeric Composites. *Journal of Natural Fibers*, p. 1-10, 2020.

HORUZ, E.; BOZKURT, H.; KARATAŞ, H. & MASKAN, M. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. *Heat And Mass Transfer*. V. 54, n. 2, p. 425-436, 2017.

KOUKOUCH, A.; IDLIMAM, A.; ASBIK, M.; SARH, B.; IZRAR, B.; BOSTYN, S.; BAH, A.; ANSARI, O.; ZEGAOU, O. & AMINE, A. Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable Energy*. V. 101, p. 565-574, 2017.

KOSASIH, E. A.; ZIKRI, A. & DZAKY, M. I. Effects of drying temperature, airflow, and cut segment on drying rate and activation energy of elephant cassava. *Case Studies in Thermal Engineering*. V. 19, p. 1-9, 2020.

MARTÍN-GÓMEZ, J.; VARO, M. Á.; MÉRIDA, J. & SERRATOSA, M. P. The influence of berry perforation on grape drying kinetics and total phenolic compounds. *Journal of The Science of Food and Agriculture*. V. 99, n. 9, p. 4260-4266, 2019.

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, V.; GOMEZ-GIL, J.; STOMBAUGH, T. S.; MONTROSS, M. D. & AGUIAR, J. M. Moisture Content Prediction in the Switchgrass (*Panicum virgatum*) Drying Process Using Artificial Neural Networks. *Drying Technology*. V. 33, n. 14, p. 1708-1719, 2015.

MENEZES, M. L.; STRÖHER, A. P.; PEREIRA, N. C. & BARROS, S. T. D. Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço do maracujá-amarelo. *Engevista*. V. 15, n. 2, p. 176-186, 2013.

ROSA, I. M.; KENNY, J. M.; PUGLIA, D.; SANTULLI, C. & SARASINI, F. Tensile behavior of New Zealand flax (*Phormium tenax*) fibres. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*. V. 29, p. 3450-3454, 2010.

SAHOO, A.; KUMAR, S. & MOHANTY, K. A comprehensive characterization of non-edible lignocellulosic biomass to elucidate their biofuel production potential. *Biomass Conversion and Biorefinery*, p. 1-17, 2020.

SAMMARTINO, L. E. K.; ARANGUREN, M. I. & REBOREDO, M. M. Chemical and mechanical characterization of two South-American plant fibers for polymer reinforcement: Caranday Palm and *Phormium*. *Journal of Applied Polymer Science*. V. 115, p. 2236-2245, 2010.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. & OLIVEIRA, E. N. A. Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. *Comunicata Scientiae*. V. 5, n. 1, p. 75-82, 2014.

THAKUR, V. J.; THAKUR, M. K. & KESSLER, M. R. (eds.). *Handbook of composites from renewable materials*. Vol. 8. Hoboken: Scrivener Publishing LLC, 2017.

V, NAYANA & KANDASUBRAMANIAN, B. Advanced polymeric composites via commingling for critical engineering applications. *Polymer Testing*. Vol. 91, p. 1-17, 2020.

VIMERCATI, W. C.; ARAÚJO, C.; MACEDO, L. L.; MARADINI FILHO, A. M.; SARAIVA, S. H. & TEIXEIRA, L. J. Q. *Influence of drying temperature on drying kinetics, energy consumption, bioactive compounds and cooking quality of pasta enriched with spinach.* Journal of Food Process Engineering. V. 43, n. 12, p. 1-12, 2020.

VIGNESHWARAN, S.; SUNDARAKANNAN, R.; JOHN, K.M.; JOHNSON, R. DEEPAK J.; PRASATH, K. A.; AJITH, S.; ARUMUGAPRABU, V. & UTHAYAKUMAR, M. *Recent advancement in the natural fiber polymer composites: a comprehensive review.* Journal of Cleaner Production. V. 277, p. 1-23, 2020.