

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DAS FOLHAS DE EUCALIPTO

RICARDO, Larissa¹; ROSA, Gabriela¹

¹Universidade Federal do Pampa, Engenharia Química; gabrielarosa@unipampa.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A madeira do eucalipto é utilizada principalmente pelas indústrias madeireira, papel e celulose. Sabe-se que as folhas do eucalipto são consideradas um resíduo, sendo desta forma, pouco exploradas industrialmente. O eucalipto pertence à família das Mirtáceas (*Myrtaceae*), e como outras plantas da mesma família, são cobertas de glândulas que segregam óleo. A fim de obter melhor rendimento do óleo essencial da folha de eucalipto, estas são submetidas ao processo de secagem.

O conhecimento das isotermas de equilíbrio se faz importante na análise de processos envolvendo a secagem e a estocagem de diversos materiais sólidos. A determinação da umidade de equilíbrio é útil para a modelagem numérica de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Ao final do processo de secagem, a umidade do produto atinge um valor que corresponde ao equilíbrio com a atmosfera ambiente, sendo este o equilíbrio termodinâmico, caracterizado pelas isotermas de equilíbrio (Kouhila et al., 2001).

Na literatura são reportados vários modelos matemáticos que descrevem o comportamento da umidade de equilíbrio para diferentes materiais. De acordo com CAURIE (1981), as equações de dois parâmetros são as mais utilizadas por serem de fácil solução matemática, porém tem o inconveniente de, em geral, não predizerem o comportamento das isotermas de equilíbrio para toda faixa de umidade relativa (0 - 1).

O objetivo deste trabalho foi determinar as isotermas de equilíbrio de folhas de eucalipto nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C. Após, realizou-se a modelagem matemática utilizando as equações de Oswin, Caurie, BET, GAB, GDW e Peleg.

2 METODOLOGIA (MATERIAL E MÉTODOS)

Para realização dos experimentos foi utilizado como matéria-prima folhas de eucalipto *in natura*. Estas foram cortadas em pequenos pedaços e colocadas em 30 potes de vidro hermeticamente fechados, garantindo uma atmosfera constante. No interior dos potes, além de suportes plásticos para colocação das amostras, havia soluções de ácido sulfúrico em concentrações diferentes para cada tréplica, garantindo a variação da umidade relativa do ar de 5 a 82 %. Os experimentos foram realizados nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, consideradas temperaturas de secagem. As pesagens das amostras foram realizadas no 7, 10 e 14º dia, até atingir a umidade de equilíbrio. Após, determinou-se o conteúdo de umidade das amostras segundo as normas da AOAC, 1995 (105 °C, 24 h).

Para realizar o tratamento dos dados experimentais foram realizadas regressões não lineares utilizando *software* estatístico e os modelos apresentados na Tab. 1. A qualidade dos ajustes dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2) e pela distribuição dos valores residuais.

Tabela 1 – Equações utilizadas para regressão dos dados.

Nome	Equação
Oswin	$X_e = k \left(\frac{UR}{1 - UR} \right)^a$
GAB	$X_e = \frac{X_m \cdot C_G \cdot d \cdot UR}{(1 - d \cdot UR) \cdot (1 - d \cdot UR + C_G \cdot d \cdot UR)}$
BET	$X_e = \frac{X_m \cdot C_B \cdot UR}{(1 - UR) \cdot [(1 - UR) \cdot (C_B \cdot UR)]}$
GDW	$X_e = \left[\frac{m \cdot B \cdot UR}{1 + (B \cdot UR)} \right] \cdot \left[\frac{(1 - b)(1 - w)UR}{1 - (b \cdot UR)} \right]$
Peleg	$X_e = (g \cdot UR^n) + (l \cdot UR^m)$
Caurie	$X_e = \exp(p + (q \cdot UR))$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 apresenta os dados experimentais das três temperaturas analisadas.

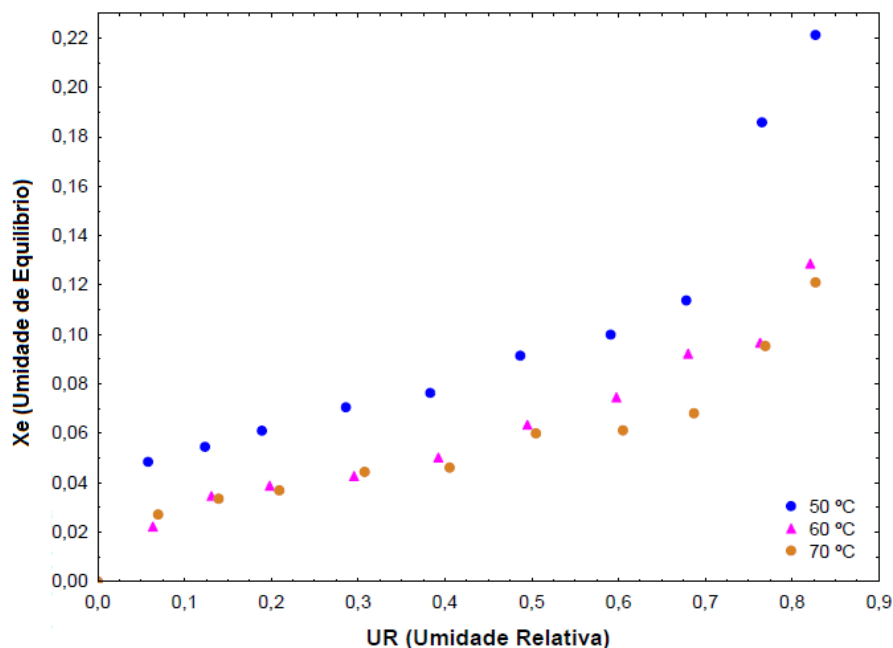


Figura 1 – Isotermas de equilíbrio, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Através da Fig. 1 observou-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio (X_e) diminuiu com o aumento da temperatura, considerando a umidade relativa (UR) constante. As curvas obtidas apresentaram formato sigmoidal, o que é muito comum em isotermas de alimentos e materiais biológicos.

Na Tab. 2 estão representados os ajustes e os valores dos parâmetros das equações, obtidos para as isotermas de dessecção da folha de eucalipto, para cada temperatura estudada, assim como o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 2 – Valores obtidos para os parâmetros de ajuste.

Ajuste	Parâmetros	Temperaturas (°C)		
		50	60	70
BET	X_m	0,5114	0,4002	0,3861
	C_B	0,7864	0,7008	0,6722
	R^2	70,95	70,9	63,24
Caurie	p	-3,5351	-3,8791	-3,9691
	q	2,3619	2,1666	2,1212
	R^2	91,57	94,77	91,33
GAB	X_m	1,6761	2,7188	1,6761
	C_G	9,2986	4,1663	9,2986
	d	0,0083	0,0125	0,0083
	R^2	85,36	92,818	85,36
GDW	m	0,4790	0,0001	0,0002
	B	0,0005	0,0707	0,0613
	b	-2107,73	-79197,6	-38495,4
	w	-902,391	-19743,5	-10860,6
	R^2	82,84	92,83	85,35
Oswin	k	0,1002	0,0646	0,0582
	a	0,4623	0,4182	0,4089
	R^2	94,16	98,64	95,98
Peleg	g	0,1080	0,0648	0,0564
	n	0,9414	0,8535	0,7983
	l	0,1080	0,0648	0,0564
	m	0,9414	0,8535	0,7983
	R^2	82,95	93,56	86,73

Os modelos de Oswin e Caurie obtiveram coeficientes de determinação maiores que 91 %. Para o ajuste dos dados com as equações de GAB, GDW, BET e Peleg os valores do mesmo coeficiente foram menores. Comparando os dados apresentados na Tab. 2 observa-se que o parâmetro X_m da equação de BET diminuiu conforme o aumento da temperatura, sendo que esse comportamento já era esperado segundo fontes da literatura. Para ARIAHU *et al.* (2006), esta diminuição pode ocorrer devido a uma redução no número total de sítios ativos para a ligação com água, sendo este o resultado de mudanças físicas e/ou químicas no produto, induzidas pela temperatura. E, segundo KAYA e KAHYAOGU (2007), o valor da umidade de monocamada (X_m) é de grande interesse, uma vez que ele indica a quantidade de água fortemente adsorvida no sítio do material e é importante para a determinação das condições de armazenagem e controle de possíveis reações de deterioração.

Considerou-se que a equação de Oswin foi o modelo que melhor se ajustou aos dados devido ao valor do coeficiente de determinação R^2 ser o mais satisfatório dentre os modelos analisados, e seus resíduos terem distribuição aleatória em torno do zero. A Fig. 2 apresenta os ajustes segundo a equação de Oswin para as três temperaturas analisadas e a distribuição dos resíduos.

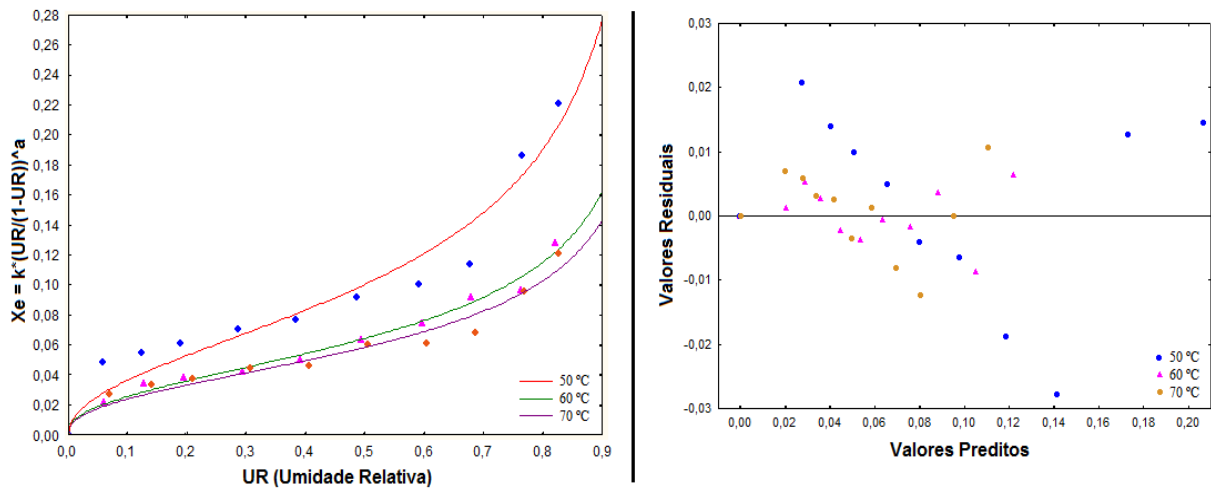


Figura 2 – Curvas com ajuste experimental segundo a equação de Oswin e distribuição dos resíduos.

BLAHOVEC (2004) afirma que o modelo matemático de Oswin deve ter seus parâmetros nos intervalos de $k > 0$ e $1 \geq a > 0$. Ter parâmetros dentro desses intervalos indica que não há ponto de inflexão na curva e, sendo assim, não há mudanças na concavidade das funções, logo, esses parâmetros possuem consistência matemática e física. Sendo assim, os valores obtidos para os parâmetros de ajuste (k e a) a partir das curvas traçadas na Fig. 2 (esq.) ficaram dentro do esperado, satisfazendo as exigências para validade da equação segundo a literatura. Na Fig. 2 (dir.) pode-se verificar que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno da linha da origem.

4 CONCLUSÃO

Observou-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio (X_e) diminuiu com o aumento da temperatura (T) a umidade relativa (UR) constante. Através do modelo de BET verificou-se que a umidade da monocamada diminuiu com o aumento da temperatura, conforme esperado. As isotermas de equilíbrio da folha de eucalipto nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, foram melhor representadas pelo modelo de Oswin, devido a este apresentar maiores coeficientes de determinação e distribuição normal de resíduos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAHU, C.C., KAZE, S.A., ACHEM, C.D., Moisture sorption characteristics of tropical fresh water crayfish (*Procambarus clarkii*). **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 355-363, 2006.
- BLAHOVEC, J. Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 489-495, 2004.
- CAURIE, M. Derivation of full range moisture sorption isotherms. In: ROCKLAND, L.B.; STEWART, G.F. **Water activity: influences on food quality**. New York: Academic Press, 1981. p. 63-87.
- KAYA, S.; KAHYAOGU, T. Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 413-421, 2007.
- KOUHILA, M. et al. Experimental determination of the sorption isotherms of Mint (*Mentha viridis*), Sage (*Salvia officinalis*) and Verbena (*Lippia citriodora*). **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 281-287, 2001.