

CINÉTICA DE SECAGEM DE DISCOS CARTONADOS EM CAMADA FINA

PEREIRA¹, P.G.; LAMONATO¹, A.; LIRA¹, T. S.; BACELOS¹, M. S.

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharias e Tecnologia
E-mail para contato: marcelo.bacelos@ufes.br

RESUMO – Diante da crescente utilização de embalagens cartonadas desenvolveram-se processos de reciclagem destas embalagens pós-consumo, como por exemplo, a produção de telhas ecológicas. Para uma maior eficiência energética do processo de fabricação de telhas, o estudo da secagem dos resíduos cartonados tem um papel de destaque. Este trabalho tem como objetivo analisar a cinética de secagem de discos cartonados em camada fina em um secador convectivo tipo túnel. Para fim de analisar as equações semi-empíricas de taxa de secagem utilizando o procedimento estatístico de discriminação de modelos semi-empíricos rivais, baseado em medidas de não linearidade. Com base nas medidas de curvatura de Bates e Watts e % de vício de Box obtidas, foi constatado que a equação que melhor representa a cinética de secagem dos discos cartonados é a de Overhults.

1. INTRODUÇÃO

A busca de um manejo adequado para os resíduos sólidos urbanos é um dos principais desafios para a sociedade moderna, sendo que, as embalagens cartonadas representam cerca de um terço desses resíduos (Neves, 2012). Apesar disso, a taxa de reciclagem dessas embalagens, embora crescente, se encontra abaixo das taxas de reciclagem de outros materiais (IBGE, 2012). Em 2013 o volume de embalagens recicladas atingiu cerca de 71 mil toneladas, representando um incremento de 9% ao praticado no ano de 2012 (Tetra Pak, 2014).

As embalagens cartonadas são formadas por camadas de diferentes materiais (75% papel, 20% polietileno de baixa densidade e 5% alumínio) que apresentam altos custos de produção e potencial poluidor. Dessa maneira, o desenvolvimento de tecnologias para a separação destes componentes torna-se atraente sob o ponto de vista ambiental e econômico (Pedroso; 2007).

Para que o processo de produção de embalagens cartonadas se torne sustentável, o papel deve ser reaproveitado pela indústria assim como o alumínio e o polietileno. Estes (PEBD e AL) podem ser reaproveitados na produção de telhas ecológicas mediante o processo de hidratação das fibras (*hidrapulper*). Em virtude da utilização de água no processo de separação dos componentes dos resíduos cartonados, os materiais provenientes deste processo apresentam uma umidade elevada que prejudicará a eficiência energética e a qualidade dos processos posteriores de reaproveitamento/reciclagem. Dessa forma, a secagem destes

materiais é imprescindível para a sua preparação para o beneficiamento futuro, no entanto, em algumas das rotas de recuperação essa etapa não é efetuada adequadamente.

Com o intuito de analisar a importância e o comportamento dos resíduos cartonados frente ao processo de redução de umidade, procederam-se com experimentos de secagem em camada fina. O objetivo deste trabalho foi representar a cinética da taxa de secagem utilizando equações semi-empíricas da literatura, provenientes de modificações do modelo difusivo. Por meio do estudo da cinética de secagem de discos cartonados em camada fina, baseado na discriminação dos parâmetros estimados, buscou-se determinar a melhor equação semi-empírica que representa a cinética de secagem.

1. METODOLOGIA

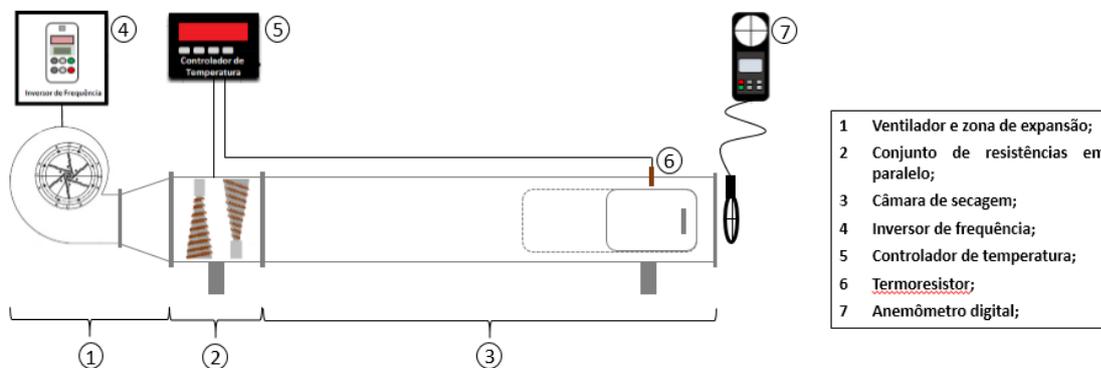
1.1 Preparação das amostras de resíduos cartonados

Os resíduos cartonados utilizados foram obtidos a partir de embalagens de leite e de suco industrializados previamente limpos e, posteriormente, foram transformados em discos cartonados com diâmetro médio de 6,0 mm. Os discos são umidificados por 24 horas em água à temperatura média de 25°C. Após a umidificação, é retirado o excesso de água dos resíduos com o auxílio de uma peneira doméstica de plástico. O resíduo úmido é, então, inserido em formas circulares confeccionadas com folhas de alumínio e essas foram introduzidas no secador convectivo.

1.2 Secagem convectiva

Para a secagem utilizou-se um secador convectivo tipo túnel (Figura 1), sendo este constituído de um ventilador (1), com vazão ajustada por meio de Triac (4), um sistema de aquecimento do ar (2) e câmara de secagem (3). A temperatura na câmara de secagem é medida por um termoresistor (6) e controlada pelo controlador de temperatura PID (5) e a velocidade do ar foi aferida com um anemômetro (7).

Figura 1- Diagrama esquemático do sistema de secagem



O procedimento seguiu um planejamento de experimentos fatorial com 2 fatores em 3 níveis com mais 2 pontos centrais, $3^2 + 2$, com o ar a temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C, sendo que para cada temperatura realizava-se experimentos com as velocidades fixas em 1m/s, 1,5m/s e

2m/s, totalizando-se 11 experimentos. As temperaturas e velocidades foram escolhidas de acordo com a capacidade do secador, baseadas em experimentos passados, de modo a otimizar a secagem. A cada 10 min as amostras eram retiradas para a pesagem da massa em uma balança analítica com precisão de 5×10^{-4} g. Após o término da secagem, as amostras são levadas por 24 horas a uma estufa que se encontra na temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$ para obtenção da massa seca da amostra.

1.3 Ajuste e análise estatística dos dados

Para ajustar os dados experimentais a equações de cinética de secagem, utilizaram-se as equações semi-empíricas de cinética de secagem apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos semi-empíricos de cinética de secagem

Nº da equação	Equação	Referência
(1)	$MR = \exp(-K.t)$ sendo $K = A.\exp(-B/T)$	Lewis (1921)
(2)	$MR = C.\exp(-K.t)$ sendo $K = A.\exp(-B/T)$	Brooker et al. (1974)
(3)	$MR = C[\exp(-K.t) + 1/9.\exp(-9.K.t)]$ sendo $K = A.\exp(-B/T)$	Henderson e Henderson (1968)
(4)	$MR = \exp(-K.t^n)$ sendo $K = A.\exp(-B/T)$	Page (1949)
(5)	$MR = \exp[-(K.t)^n]$ sendo $K = \exp(A + B/T)$	Overhults et al. (1973)

Sendo “T” a temperatura do ar (em Kelvins), “t” é o tempo de secagem (em segundos) e A, B, C e n adimensionais a serem estimados. MR é o adimensional de umidade pela equação 6.

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_0 - M_{eq})} \quad (6)$$

em que: M é a umidade em base seca em um dado instante, M_0 e M_{eq} são, respectivamente, as umidades em base seca inicial e de equilíbrio.

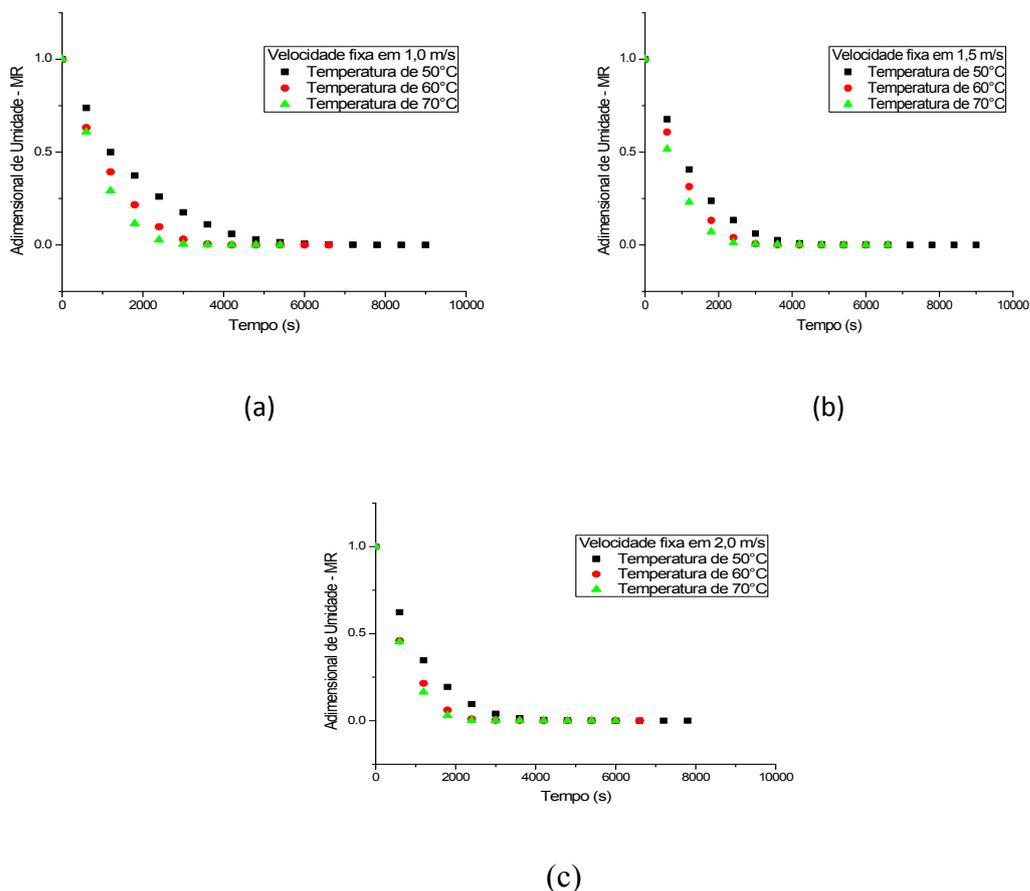
Para encontrar a equação que melhor representa o comportamento dos dados experimentais de cinética de secagem utilizou-se de um procedimento estatístico de discriminação de

modelos rivais, que tem como base medidas de não linearidade, ou seja, medidas de curvatura de Bates e Watts (1980) e de vício de Box (1971).

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra os dados do adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de secagem de 50, 60 e 70°C, parametrizado nas velocidades do ar de 1, 1,5 e 2,0 m/s, respectivamente.

Figura 2: Adimensional de umidade em função do tempo e da temperatura do ar de 50, 60 e 70 °C parametrizado na velocidade do ar de 1,0 m/s (a), 1,5m/s (b) e 2,0 m/s (c).



Pela análise dos dados da Figura 2, para todas as velocidades do ar investigadas, nota-se um efeito significativo da temperatura sobre a secagem convectiva de discos cartonados. Além disso, a variação de temperatura de 60 para 70 °C apresentou um menor incremento de tempo de secagem do que a variação de 50 para 60 °C.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de estimativa de parâmetros dos modelos de cinética de secagem semi-empíricos. Devido à baixa influência da velocidade do ar na secagem dos discos cartonados, os dados da secagem para diferentes velocidades foram

agrupados e analisados conjuntamente, fornecendo uma estimativa única de parâmetros para as equações semi-empíricas avaliadas.

Tabela 2- Parâmetros estimados e medidas de curvatura

Referência	R ²	Parâmetro	Valor Estimado	% de Vício de Box
Lewis*	0,9816	IN 0,0276	A 5,8678	37,6529
		PE 50,9402	B 2892,8658	0,0190
Brooker**	0,9818	IN 0,0524	A 5,7536	36,7901
		PE 61,6676	B 2881,9411	0,0194
			C 1,0161	0,0066
Henderson e	0,9778	IN 0,0605	A 6,3835	49,7399
		PE 71,7638	B 2942,4454	0,0250
Henderson**	0,9847	IN 0,0898	C 0,9240	0,0079
		PE 61,2420	A 6,0740	36,5050
			B 3320,2543	0,1302
Page**	0,9847	IN 0,0898	N 1,1739	0,1211
		PE 0,0904	A 1,5367	0,1063
			B -2828,4502	0,0161
Overhults**	0,9847	IN 0,0898	N 1,1739	0,1210
		PE 0,0904		

* $1/2\sqrt{F_{(2;113;0,95)}} = 0,113$

** $1/2\sqrt{F_{(3;112;0,95)}} = 0,171$

Pela Tabela 2, nota-se que nas cinco equações a curvatura intrínseca (IN) não possui valor significativo, já que esta apresenta valores menores do que $1/2\sqrt{F}$. Na curvatura paramétrica (PE), curvatura devido a efeitos de parâmetro, apenas a equação de Overhults possui valor menor do que $1/2\sqrt{F}$. Se (PE) é superior a $1/2\sqrt{F}$, pelo menos um dos parâmetros apresenta comportamento não linear, tal parâmetro pode ser determinado de acordo com o percentual de Vício de Box, devendo esse ser maior do que 1 %. As equações de Page e Overhults apresentaram os maiores valores para o R² e, portanto, melhor representaram os dados de

cinética de secagem dos discos cartonados. Porém, como foi dito anteriormente, a equação de Page possui um comportamento não linear, ou seja, $(PE) > 1/2\sqrt{F}$.

4. CONCLUSÃO

Com base nas análises estabelecidas neste trabalho, pode-se concluir que a cinética de secagem é significativamente influenciada pela temperatura do ar de secagem. Além disso, devido a reparametrização evidenciada na equação de Overhults, isso o torna o melhor modelo para representar a cinética de secagem de discos cartonados.

5. REFERÊNCIAS

ALVARENGA, L. M., **Pirólise de resíduos de embalagens cartonadas e seus componentes puros: Uma avaliação cinética**. 2013.109f. Dissertação (Mestrado em Energia– Centro Universitário Norte do Espírito Santo).- Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2013.

BACELOS, M. S.; JESUS, C. D. F.; FREIRE, J. T. Modeling and Drying of Carton Packaging Waste in a Rotary Dryer. **Dry. Technology**, v. 27, p. 927-937, 2009.

BATES, D.M.; WATTS, D.G. **Relative Curvature Measures of Nonlinearity**. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B**, v.42, p.1-25, 1980.

HENDERSON, J.M.; HENDERSON, S.M. A Computacional Procedure for Deep-Bed Drying Analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.13, p.87-95, 1968.

IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS) – Brasil 2012**. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/indicadores_desenvolvimento_sustentavel/2012/ids2012.pdf>. Acesso em: 16 de novembro de 2014.

NEVES, A. C. R. R.; CASTRO, L. O. A. Separação de materiais recicláveis: panorama no Brasil e incentivos à prática. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 8, n.º. 8, p. 1734-1742, 2012.

OVERHULTS, D.G.; WHITE, G.M.; HAMILTON, H.E.; ROSS, I.J. “Drying Soybeans with Heated Air”. **Transactions. of the American Society of Agricultural Engineer**, v.16, n.2, p.195-200, 1973.

PEDROSO, M. C.; ZWICKER, R. Sustentabilidade na cadeia reversa de suprimentos: um estudo de caso do Projeto Plasma. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 42, n.º. 4, p. 414-430, 2007.

TETRA PAK. **Reciclagem**. Disponível em: < http://www.tetrapak.com/br/reciclagem>. Acesso em: 13 de novembro de 2014.