

Estudo da secagem da polpa de celulose branqueada**Study of cellulose pulp drying**

DOI:10.34117/bjdv6n10-605

Recebimento dos originais: 13/09/2020

Aceitação para publicação: 27/10/2020

Alex Karl Oscar Schmidt

Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química

Endereço: Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, São Bernardo do Campo - SP, 09850-901, Brasil.

Rodrigo Condotta

Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química

Endereço: Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, São Bernardo do Campo - SP, 09850-901, Brasil.

E-mail: rcondotta@fei.edu.br

RESUMO

O conhecimento da cinética de secagem de um certo produto a ser seco contribui para a otimização e desenvolvimento de equipamentos e das condições mais específicas para cada produto processado, uma vez que esta é uma operação unitária bastante utilizada na indústria e uma das mais onerosas. Este trabalho teve como objetivo estudar a secagem de celulose sob diferentes condições (tipos de secadores, temperatura e velocidade do agente secante) e o ajuste dos dados experimentais aos modelos matemáticas empíricos e teóricos existentes em literatura. Verificou-se que o melhor modelo empírico para se descrever a secagem da celulose nas condições estudadas foi o modelo de Midilli. Já o coeficiente de difusão efetivo, obtido segundo a expressão de Crank, se mostrou dependente tanto da temperatura como da velocidade do ar de secagem.

Palavras-chaves: polpa celulose, umidade normalizada, modelos empíricos e teóricos, coeficiente de difusão efetiva.

ABSTRACT

The knowledge of the drying kinetics a product is essential for optimization and development of equipment and selection of the most specific conditions for each material to be dried. Drying is a unit operation widely used in the industry and one of the most expensive. This work aimed to study the static drying of cellulose under different conditions (types of dryers, temperature and air flow rate) and the accuracy of experimental drying profile according empirical and theoretical mathematical models available in literatura. It was found that the best empirical model to describe cellulose drying at studied conditions was the Midilli model. The effective diffusion coeficiente, calculated from Crank's expression (1975), has demonstrated dependent on both temperature and air flow rate.

Key-words: cellulose pulp, normalized humidity, empirical and theoretical models, effective difusion coeficient.

1 INTRODUÇÃO

A secagem é um processo amplamente presente nas mais diversas atividades realizadas pelo homem, que há séculos tem-se utilizado, dentre suas inúmeras aplicações, como um dos principais artifícios para a preservação de alimentos e, portanto, decisivo no processo evolutivo da humanidade. Na atualidade esta operação continua a possuir grande relevância como parte unitária da produção de diversos setores das indústrias, como alimentício, farmacêutico, papel e celulose, mineração e energético, bens de consumo, entre outros.

O fenômeno da secagem pode ser caracterizado como um processo de separação no qual o objetivo é a remoção de substâncias na fase líquida contida na mistura com sólidos, semissólidos e, até mesmo, outros líquidos.

A título de exemplificação de processos de remoção de líquido (água) pode-se citar dois, fundamentais na produção de papel e celulose por processos mecânico e *Kraft*: a evaporação do licor "negro" proveniente da etapa de cozimento dos cavacos de madeira, com o objetivo de reduzir o volume de água presente e se obter um produto mais concentrado para subsequente queima na caldeira; e um segundo, o qual faz parte do objeto do escopo deste trabalho, a secagem da polpa de celulose para a produção de papel e celulose "seca".

Segundo Dincer & Zamfirescu (2016), aproximadamente 15% do consumo de energia na América do Norte se destinam aos setores em que a secagem é utilizada em alguma parte do processo produtivo. Na indústria de papel e celulose, todo o processo que emprega a celulose - tratamento e depuração da polpa de celulose, embalagem e manuseio dos fardos produzidos – consomem cerca de 20% da energia total da planta.

Aliado a crescente busca global por redução unitária do consumo de energia, é natural que os projetos de desenvolvimento e dimensionamento de secadores tenham grande interesse na eficiência energética e, conseqüentemente, na compreensão e domínio do fenômeno de remoção da umidade do material de interesse. A identificação dos mecanismos de transferência de calor e massa em cada etapa do processo de secagem, ou seja, a determinação da cinética de secagem específica de cada material, sob as condições externas reais do processo permite a confecção de equipamentos específicos e energeticamente mais eficientes.

1.1 CINÉTICA DA SECAGEM

Em qualquer processo de secagem a forma com que a fase líquida é transportada do interior do sólido para sua superfície e, consecutivamente, sua difusão para o agente secante, influência

significativamente na taxa de secagem e nas variáveis operacionais dos secadores como, por exemplo, a velocidade do fluido secante, umidade relativa e temperatura.

A secagem pode ocorrer através de três maneiras distintas, dependendo das taxas de transferência do vapor da umidade para o fluido secante e do transporte de umidade no interior do material sólido: (a) evaporação da camada líquida na superfície do sólido; quando a taxa de difusão do líquido no interior da matriz é maior que a taxa de evaporação da camada líquida na superfície, (b) evaporação na superfície do sólido; quando a taxa de difusão do líquido no interior da matriz é menor que a taxa de evaporação da camada líquida na superfície, (c) evaporação no interior da matriz; quando a taxa de difusão do líquido no interior da matriz é menor que a taxa de evaporação e seu transporte até a superfície do sólido.

Assim, a complexidade do processo de secagem reside no fato da operação compreender, principalmente, transferências de massa e calor de forma transiente e simultânea. Além destes, outros processos podem ocorrer durante a secagem de um material, como transformações físicas e químicas, que por sua vez influenciam nas taxas de transporte de massa e calor, e, por consequência, na taxa de secagem (MUJUMDAR; DEVAHASTIN, 2000).

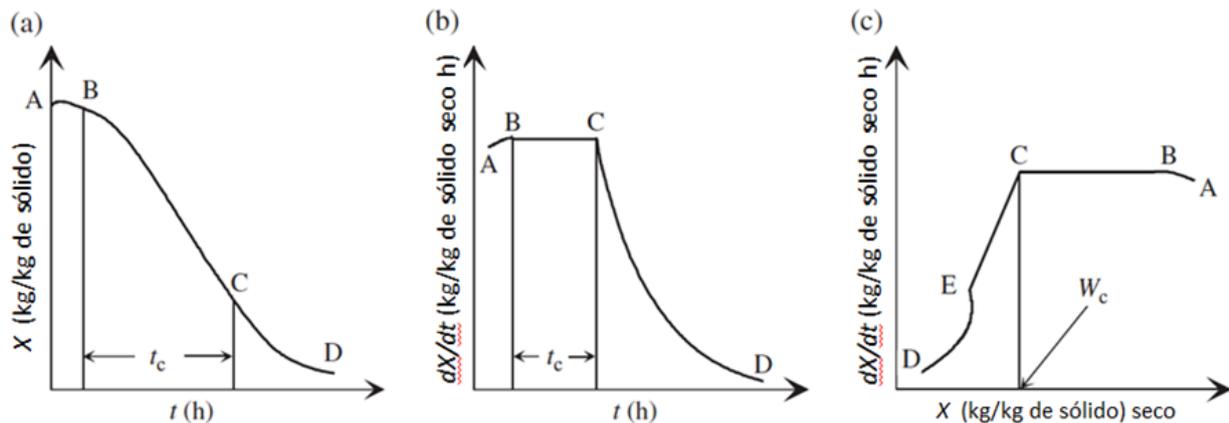
Em linhas gerais, o estudo de um processo de secagem (perfil de secagem) consiste na análise das variações do teor de umidade médio ao longo do tempo, podendo também ser avaliada a variação da temperatura ao longo do processo. Já os estudos de cinética de secagem possibilitam a obtenção de dados relativos à taxa de evaporação, períodos de secagem, consumo de energia, entres outros, fundamentais para a modelagem de processos e secadores (DINCER; ZAMFIRESCU, 2016).

Os processos de secagem, na maioria dos casos, são caracterizados por variações típicas do teor de umidade em função do tempo e da taxa com que o solvente é retirado do material (taxa de secagem). Tais variações típicas delimitam os períodos que constituem o processo e, conseqüentemente, as diferentes taxas de secagem ao longo do processo, as quais podem ser determinadas pela equação (1) e identificadas pelo seu comportamento quando apresentadas na forma gráfica, conforme demonstrado na Figura 1:

$$R = -\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -\frac{M}{A} \frac{dX}{dt} \quad (1)$$

onde: R é a taxa de secagem (massa de umidade por unidade de área por unidade de tempo), A é a área superficial do sólido em contato com o agente secante, m é a massa de umidade, M é a massa de sólido seco (kg água/kg sólido seco), X é a umidade do sólido (massa de umidade por massa de sólido seco) e t é o tempo.

Figura 1: Curvas típicas de processos de secagem à temperatura e umidade relativa constante: (a) umidade em função do tempo; (b) taxa de secagem em função do tempo; (c) taxa de secagem em função da umidade. Seções A-B: etapa inicial de secagem; B-C etapa de secagem a taxa constante; C-(E)-D: etapa de secagem a taxa decrescente (DINCER; ZAMFIRESCU, 2016).



A determinação da taxa de secagem constante e decrescente com perfil linear são facilmente correlacionadas com a equação (1). Já a cinética de secagem decrescente de perfil não linear é frequentemente associada ao fenômeno difusivo no interior do sólido, representado pelo modelo de Fick, conforme equação (2):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2)$$

onde D_L é o coeficiente de difusão do transporte de massa, x é a meia espessura do material.

Este tipo de difusão é típico do último estágio de secagem do conteúdo de água ligada presente em materiais como a madeira e o papel (GEANKOPLIS, 1993).

A solução analítica do modelo difusivo é derivada por Crank (1975), em que a difusividade e as propriedades do sólido são consideradas constantes, o conteúdo de umidade inicial uniforme no interior do sólido, e os efeitos do encolhimento desprezíveis. Aplicando condições de contorno e inicial às quais um modelo de placa infinita está sujeito, conforme descrito por Perazzini *et al.* (2014), obtêm-se a expressão (3) para a geometria plana:

$$UR = \frac{X - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_L t}{4L^2} \right] \quad (3)$$

onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio e X_i é a inicial do período de taxa de secagem decrescente e UR é a umidade livre normalizada.

Salienta-se que o coeficiente D_L representa a difusão efetiva da massa de água no processo secagem, levando em consideração tanto o transporte difusivo do líquido quanto o do vapor (PERAZZINI, 2014). Outros mecanismos de transportes, quando presentes, como capilares e fluxos hidrodinâmicos devido a gradientes de pressão, também são representados pelo coeficiente. Além disso o coeficiente de difusão é uma função da umidade contida no material e da temperatura, devendo o seu valor ser obtido experimentalmente, e ser considerado uma representação empírica do período de taxa decrescente do processo (MUJUMDAR; DEVAHASTIN, 2000). A relação amplamente utilizada na literatura para se estimar o efeito da temperatura no coeficiente de difusão efetiva (D_L) é a de Arrhenius (MUJUMDAR; DEVAHASTIN, 2000; ERBAY; ICIER, 2010; PERAZZINI, 2014), descrita pela equação (4):

$$D_L = D_0 \exp \left[- \frac{E_a}{RT_{abs}} \right] \quad (4)$$

onde D_0 é o fator de Arrhenius, geralmente definido como o coeficiente de difusão de referencia a temperatura infinitamente alta, E_a é a energia de ativação para a difusão, R é a constante universal dos gases, e T_{abs} a temperatura em escala absoluta.

Uma análise um pouco mais simplificada do comportamento de secagem pode ser realizada utilizando-se os modelos semi-teóricos, que também são desenvolvidos a partir da segunda lei de Fick utilizando-se de modificações das formas simplificadas da equação, enquanto outros são derivados por analogia à lei de resfriamento de Newton. Estes modelos são mais simples, não necessitando de tantas suposições quanto necessárias pelos modelos teóricos, já que dependem de dados experimentais. Por outro lado, são somente aplicáveis às determinadas condições específicas de processo (ERBAY; ICIER, 2010).

Finalmente, uma análise genérica e bem mais simples de processos de secagem poder ser realizada a partir de modelos empíricos, os quais dependem intensamente das condições experimentais e fornecem poucas informações sobre o comportamento do fenômeno no interior do material, sendo assim baseados em dados experimentais e análises dimensionais. Estes modelos são extremamente difundidos na literatura (KUCUK *et al.*, 2014).

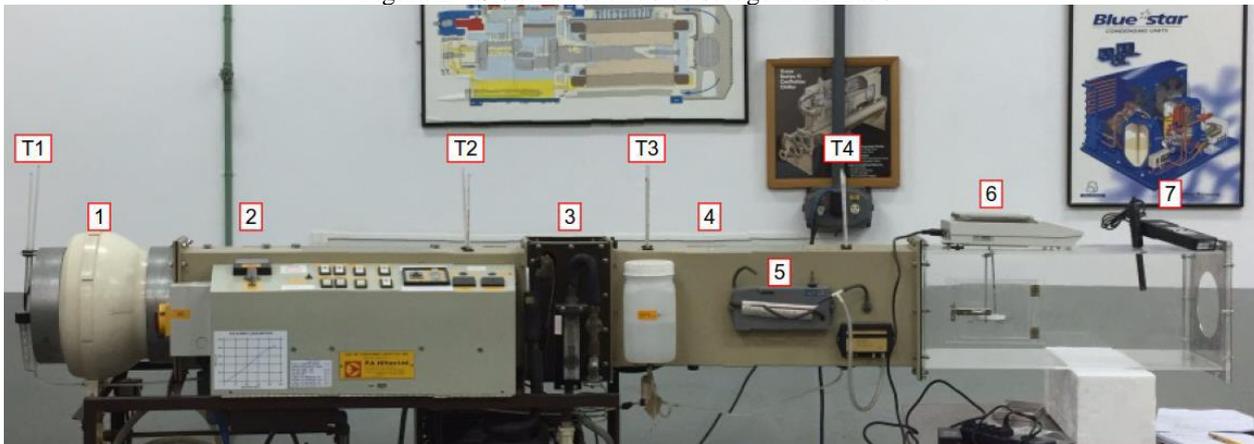
2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo da cinética de secagem da celulose, moldes no formato de discos de 70mm de diâmetro e 5 mm de espessura foram confeccionados a partir de folhas de celulose branqueadas doadas pela empresa International Paper. Estas folhas foram trituradas, separadas em porções de

25 g, as quais foram adicionadas em 800ml de água destilada aquecida para formação de uma polpa de celulose. Em seguida, esta polpa foi inserida num molde cilíndrico e prensada para remoção do excesso de umidade até atingir a espessura de 5mm. Os discos foram submetidos ao processo de secagem em estufa pré-aquecida (modelo Q317M - Químis), sob três diferentes temperaturas (40°C, 80°C e 100°C), através de ambas as faces. As amostras foram pesadas a cada 10 minutos para quantificar a quantidade de água evaporada numa balança eletrônica, modelo AS2000C (Marte).

Também foram realizados experimentos de secagem num secador tipo túnel descontínuo, ilustrado pela Figura 1, na faixa de temperaturas de 40°C a 70°C, com ar insuflado em velocidades de 1,5 e 3,0 m/s, no intuito de se adicionar a variável velocidade do ar no estudo da cinética de secagem e no coeficiente de difusão. O processo foi repetido pelo menos em duplicata para cada condição de secagem.

Figura 2 – Sistema contínuo de secagem utilizado.



O equipamento representado na Figura 1 possui: (1) ventilador de diâmetro 150 mm com cinco pás, (2) controle de velocidade do ventilador, (3) evaporador do sistema de refrigeração para resfriamento e remoção da umidade do ar secante, (4) seção de resistências elétricas para aquecimento do ar, (6) balança eletrônica com porta amostra suspenso (7) saída. O sistema ainda possui 4 pares de termo higrômetro para registro da temperatura e umidade do ar (T1, T2, T3 e T4) ao longo do equipamento.

Finalmente, as umidades iniciais e finais das amostras foram determinadas com auxílio de uma balança por infravermelho, modelo IV-2000 (Gehaka), segundo procedimento da ISO 287:2009. Estas umidades foram utilizadas como referências para as umidades no instante t_0 (X_0) e de equilíbrio (X_{eq}), todas em base seca, utilizadas nos modelos empíricos para o ajuste dos dados experimentais, conforme apresentados na Tabela 1 (Vieira, Rocha, 2008):

Tabela 1 – Modelos propostos para o estudo da cinética de secagem da polpa de celulose.

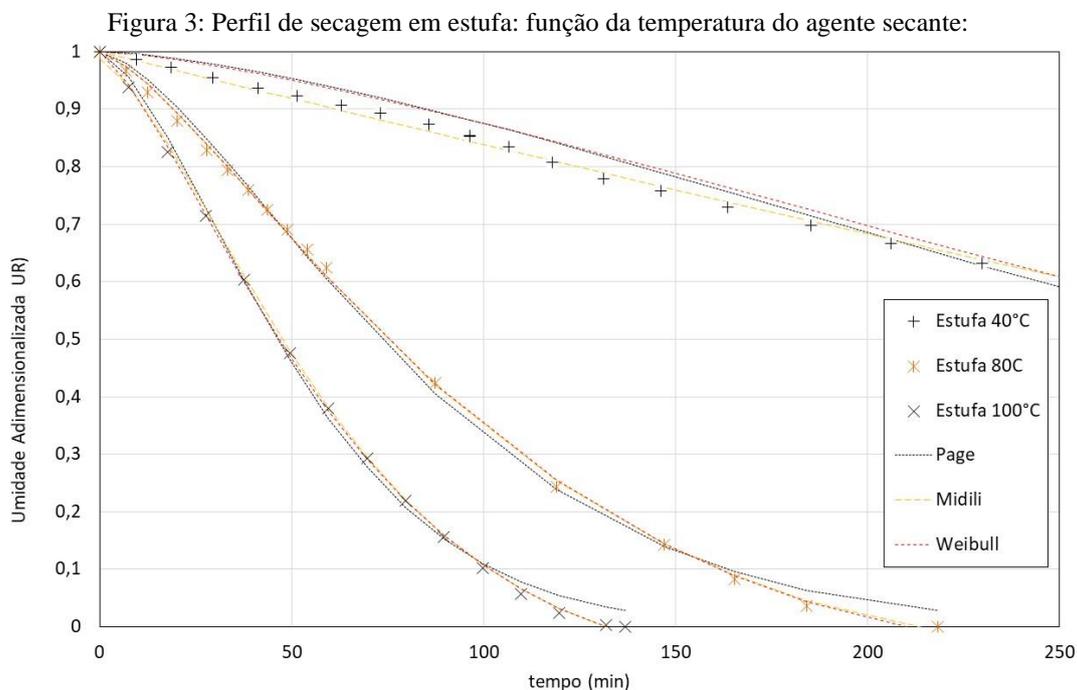
MODELO	EQUAÇÃO	UMIDADE ADIMENSIONAL
PAGE	$UR = \text{EXP}(-k \cdot t^n)$	$UR = \frac{X_t - X_E}{X_0 - X_E}$
MIDILLI	$UR = A \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	
WEIBULL	$UR = A - B \cdot \text{EXP}(-k \cdot t^n)$	

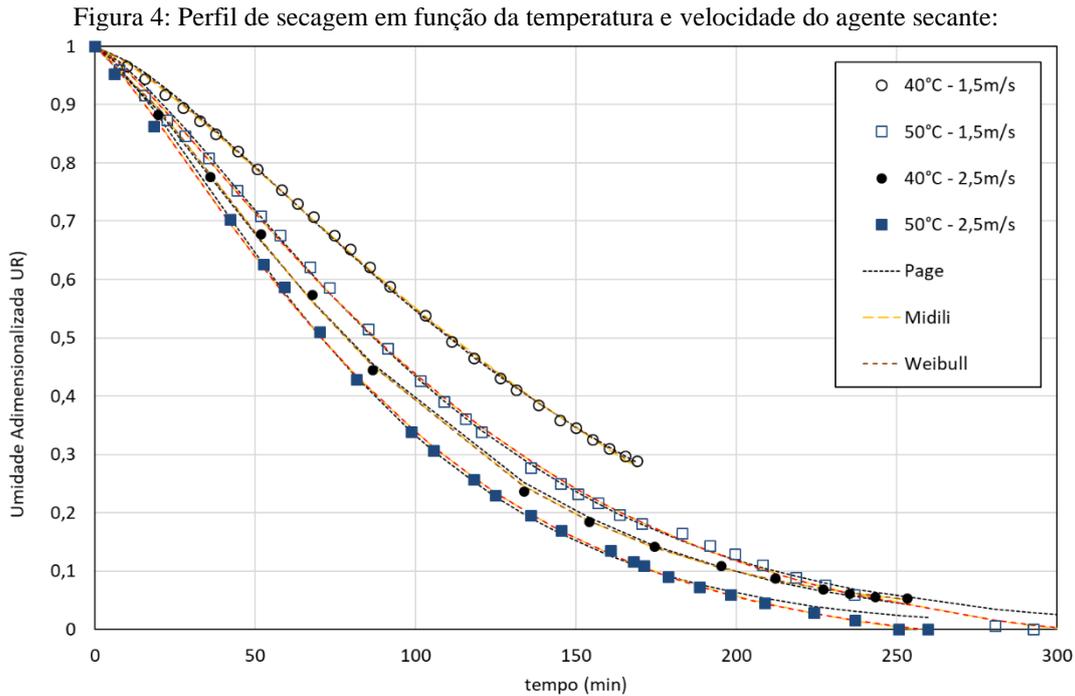
A escolha do melhor modelo é baseada nas análises dos coeficientes de determinação (R^2) e do erro médio estimado (SE), obtido segundo a equação (5) (Melo *et al.*, 2015):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (UR_{exp,i} - UR_{pred,i})^2}{N - n_i}} \quad (5)$$

3 RESULTADOS

As curvas de secagem obtidas nas diferentes condições experimentais de secagem são apresentadas nas Figuras 3 e 4, bem como os modelos cinéticos ajustados. Sendo a umidade relativa estimadas a partir das massas iniciais e finais do material, os desvios padrões na medida da massa e na umidade de equilíbrio percentual do ar foram de 0,019 e 2,935, respectivamente.





Constata-se que o perfil da secagem em estufa a 80°C são próximas das observadas no secador tipo túnel em temperatura inferiores (40°e 50°C), o que representa uma condição energeticamente mais favorável. Além disso, é possível verificar perfis distintos para o processo conduzido no túnel sob diferentes temperatura e velocidade do ar, ainda que estas variações sejam pequenas. Identifica-se claramente na Figura 4 que a velocidade de secagem é mais afetada pela velocidade do ar do que sua temperatura (40°C e 2,5m/s abaixo da curva 50°C e 1,5 m/s). Desta forma, conclui-se que a secagem da celulose é dependente tanto da velocidade como da temperatura do ar empregado, bem como do tipo de secador utilizado.

Visualmente ainda é possível afirmar que o modelo de Page é o que menos se ajusta aos pontos experimentais, principalmente na secagem em estufa. Analisando os coeficientes de ajustes dos demais modelos, apresentados na Tabela 2, conclui-se que o modelo de Midilli é o mais representativo da cinética de secagem da celulose. Os valores dos parâmetros deste modelo para cada condição de secagem e equipamento ensaiados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos segundo os modelos testados

MOD ELO	CO EF.	ESTUF A 40°C	40°C - 1,5M/S	40°C - 2,5M/S	50°C - 1,5M/S	50°C - 2,5M/S	ESTUF A 80°C	ESTUF A 100°C
MIDI LLI	R ²	0,9977	0,9995	0,9996	0,9994	0,9996	0,9992	0,9994
	SE	5	4	6	4	5	2	4
WIEB ULL	R ²	0,0179	0,0053	0,0070	0,0078	0,0062	0,0107	0,0094
	SE	1	3	3	4	8	3	4
	R ²	0,9978	0,9995	0,9996	0,9994	0,9996	0,9992	0,9997
	SE	4	2	6	3	5	8	1
	R ²	0,0175	0,0045	0,0070	0,0079	0,0072	0,0103	0,0067
	SE	4	4	5	4	7	5	6

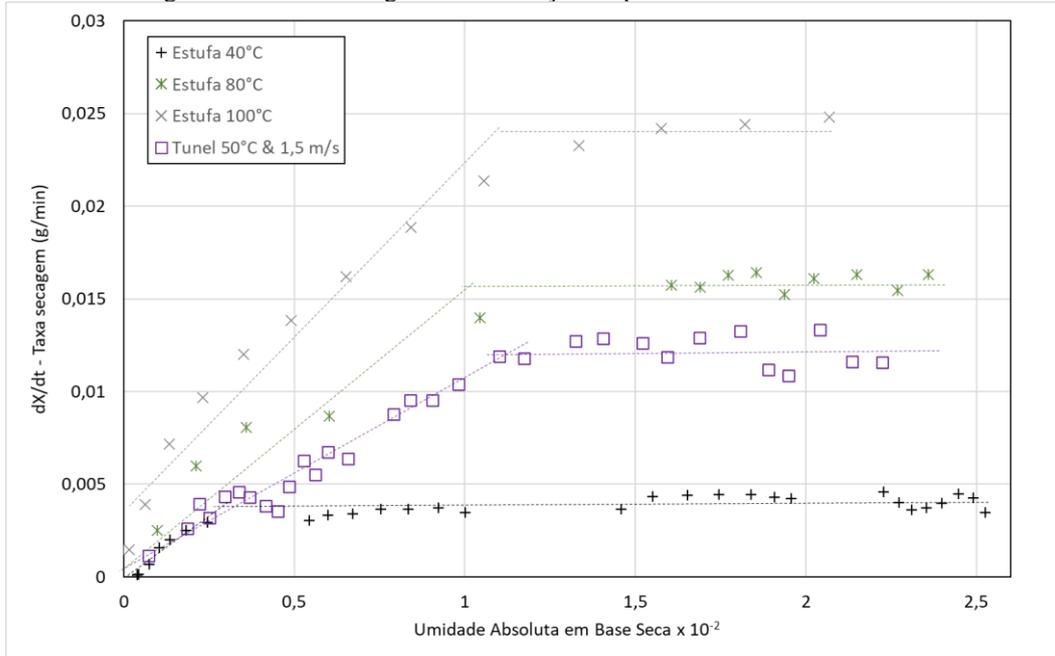
Tabela 3 – Parâmetros do modelo de Midilli para cada condição de secagem

PARÂMETROS	ESTUF A 40°C	40°C - 1,5M/S	40°C - 2,5M/S	50°C - 1,5M/S	50°C - 2,5M/S	ESTUF A 80°C	ESTUF A 100°C
K	0,00045	0,00117	0,0021 3	0,00214	0,0026 5	0,00161	0,00233
A	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,9871
B	-	-	-0,0007	-	-	-	-
	0,00027	0,00049		0,00048	0,0004	0,00030	0,00047
N	1,25940	1,32017	1,3301 7	1,28700	1,3486 8	1,38850	1,45162

Analisando os dados apresentados na Tabela 3, verifica-se que a constante k do modelo de Midilli aumenta com a temperatura em todos os casos, sendo observado o seu máximo na condição em túnel à 50°C e 2,5m/s, superior até mesmo a estufa à 100°C. Em relação aos valores da constante a e n , estes se mostraram praticamente constante e uma maior variação foi observada no caso da estufa à 100°C, mas ao que tudo indica, estes parâmetros se mostram ser independentes tanto do tipo de secador e como das condições de secagem aplicadas, sendo função exclusivamente do material. Já o parâmetro b de Midilli mostrou-se ser influenciado por todas as condições operacionais da secagem.

Para estimativa do coeficiente de difusão do modelo teórico (Fick/Crank), apenas os dados do período de secagem sob taxa decrescente, para o qual o transporte por difusão se torna o mecanismo controlador do processo de secagem, devem ser ajustados ao modelo matemático. Para tanto, um gráfico da taxa de secagem em função da umidade absoluta foi construído, conforme ilustrado pela Figura 5, para identificar o ponto de transição entre os distintos períodos de secagem.

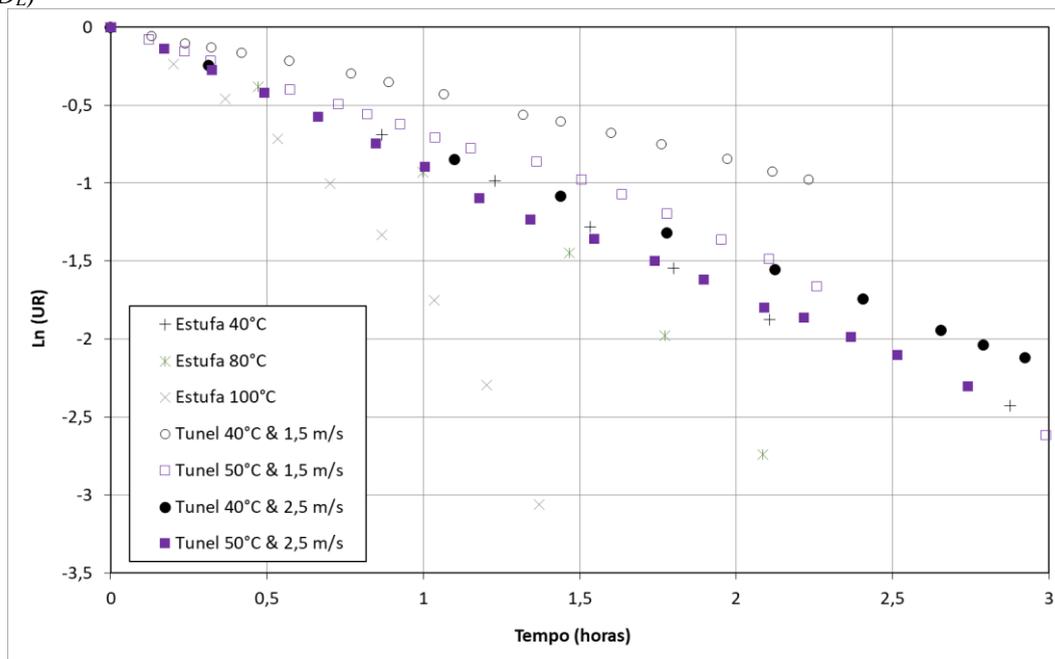
Figura 5: Taxa de secagem: identificação do período de taxa decrescente:



Observando-se a Figura 5, conclui-se que o fenômeno de difusão se inicia em teores de umidades superiores para as maiores temperaturas. Entretanto, mesmo adentrando neste novo período de taxa de secagem, as taxas de secagem ainda continuam sendo superiores às observadas nos períodos de taxa constante, para as temperaturas inferiores. Isto é um primeiro indicativo de que o coeficiente de difusão é função da temperatura do processo.

No intuito de se comprovar esta afirmação, foi construído um gráfico do logarítmico da umidade normalizada, apenas da região decrescente, em função do tempo, conforme equação (3). Esta análise gráfica, ilustrada pela Figura 6, permitiu a obtenção de um coeficiente de difusão efetivo médio para cada condição de temperatura, velocidade e equipamento.

Figura 6: Logaritmo da umidade normalizada em função do tempo de secagem: estimativa do coeficiente de difusão efetivo (D_L)



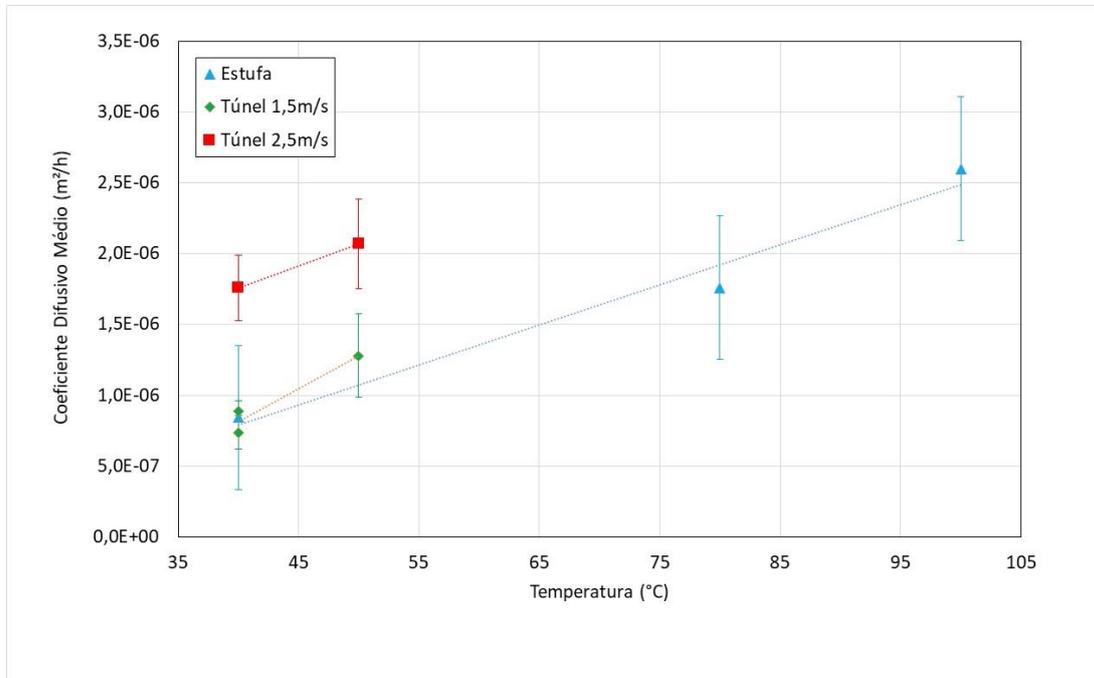
A partir da Figura 6, verifica-se que, para as secagens realizadas em temperaturas inferiores, o comportamento dos dados experimentais permanece linear durante todo o período de secagem. Isto significa que o coeficiente de difusão permanece praticamente constante durante todo o processo de secagem, inferindo que a velocidade de difusão interna ao sólido é próxima da difusão externa da umidade para o agente secante. Entretanto, mesmo para o comportamento linear e, conseqüentemente, um coeficiente difusivo único e constante, observa-se diferentes inclinações dos pontos experimentais sob diferentes velocidades do ar de secagem, indicando que este coeficiente difusivo constante, é função da temperatura e velocidade do ar de cada processos de secagem.

Nas secagens conduzidas em temperatura maiores, onde o processo de remoção da umidade superficial do sólido é mais expressivo, a difusão interna passa a apresentar uma relação de dependência com a umidade residual do sólido (comportamento curvilíneo da Figura 6), além da temperatura e velocidade do ar de secagem já explanados.

Os coeficientes de difusão efetivos (D_L) foram plotados em função da temperatura do ar de secagem (Figura 7). Analisando-se este gráfico, verifica-se que os valores dos coeficientes efetivos de difusão para o processo de secagem conduzidos no túnel de vento são distintos para as duas velocidades de secagem utilizadas, mas impreciso para o intervalo estreito de temperatura investigado (40° e 50°C), por isso as duas inclinações distintas. No que se refere a secagem em estufa, os valores dos coeficientes são significativamente distintos e altamente dependente da temperatura de secagem.

Conclui-se ainda que a secagem realizada no túnel à 50°C e 2,5 m/s de velocidade do ar apresenta um coeficiente similar a secagem em estufa à 80° e 100°C, mostrando esta ser uma condição econômica mais favorável.

Figura 7: Coeficiente difusivo efetivo (D_L) em função da temperatura e velocidade de ar de secagem:



4 CONCLUSÕES

O tempo de secagem da celulose diminui com o aumento da temperatura e da velocidade do ar nas condições estudadas. Dentre os modelos empíricos capazes de descrever cinética de secagem, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, apresentando coeficiente de ajuste (R^2) superior à 0,99, além de apresentar parâmetros distintos para o material e para o processo de secagem.

A influência da velocidade do agente secante foi claramente observada na redução do período de taxa constante de secagem em túnel de vento, quando comparado aos resultados dos experimentos em estufa a temperaturas equivalentes. O aumento da velocidade do ar possibilita uma redução na temperatura do processo de secagem, o que é interessante para o projeto de secadores para esta aplicação específica (secagem celulose), visando uma economia energética, evidenciado neste trabalho. Nas secagens realizadas no equipamento tipo túnel, verificou-se que a condição de secagem a 40°C e 2,5m/s se mostrou ser mais vantajosa quando comparada com a conduzida a 50°C e 1,5m/s.

Finalmente, em termos do coeficiente de difusão efetivo, este se mostrou ser linearmente dependente com a temperatura, apesar de também ser função da velocidade do agente secante empregado. Assim sendo, conclui-se que o processo realizado em estufa, a secagem realizada sob a temperatura (100°C) foi a mais rápida, apresentando o maior valor para o coeficiente de difusão efetivo.

Entretanto, a secagem conduzida a 80°C se mostrou bastante similar a realizada no túnel a 50°C e velocidade 2,5 m/s. Desta forma, um menor aquecimento da corrente gasosa se mostra ser energeticamente mais favorável, além de ser uma alternativa para situações de degradação do material devido a elevada temperatura.

AGRADECIMENTOS/FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALBINI G., FREIRE F. B., FREIRE J. T. Secagem de grãos de cevada (*Hordeum vulgare*) em leito fixo, Anais do COBEQ 2016, *Galoá Proceedings*, 2017.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2 ed. England: Oxford University Press, 1975.
- DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. *Drying Phenomena: theory and applications*. Wiley, 2016.
- ERBAY, Z.; ICIER, F. A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 50, n. 5, p. 441–464, 2010.
- GEANKOPLIS, C. J. *Transport processes and unit operations*. Prentice-Hall International, 3 ed., 1993.
- KUCUK, H.; MIDILLI, A.; KILIC, A.; DINCER, I. A Review on Thin-Layer Drying-Curve Equations. *Drying Technology*, v. 32, n. 7, p. 757–773, 2014.
- MELO J. C. S.; PEREIRA, E. D.; COSTA C. H. C.; OLIVEIRA K. P., Modelagem matemática das curvas de secagem da pimenta de cheiro, Anais do COBEQ 2014, *Blucher Proceedings*, 2015.
- MUJUMDAR A. S. *Industrial Transfer Processes*, National University of Singapore, 2011.
- MUJUMDAR, A. S.; DEVAHASTIN, S. *Fundamental Principles of Drying*. In: Mujumdar's practical guide to industrial drying (ed. A.S. Mujumdar), Exergex Corporation, p. 1–22, 2000.
- PERAZZINI, H. Secagem de sólidos porosos granulares (dissertação), UFSCar, São Carlos, 2014.
- VIEIRA M. G. A., ROCHA S. C. S. Mathematical modeling of handmade recycled paper drying kinetics and sorption isotherms, *Braz. J. Chem. Eng.*, v. 10, n. 2, p. 299-312, 2008.