

## AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA FINA DE BAGAÇO DE LARANJA E SEMENTES DE MAMÃO PAPAIA COM MUCILAGEM

Antonio Batista Oliveira Junior – Engenheiro Químico e Segurança Trabalho –  
CREA 53.408-D – MG  
CREA SP - 5060528892  
[antonio.junior@unifeb.edu.br](mailto:antonio.junior@unifeb.edu.br)

Angélica Cristina Alves de Lima – Engenheira Química  
CREA  
[angelicaalvesdelima@gmail.com](mailto:angelicaalvesdelima@gmail.com)

Luiza Idalina Silva Leite  
CREA  
EMAIL....

*RESUMO – Este trabalho teve por objetivo estudar a cinética de secagem do bagaço de laranja e sementes de mamão papaia com mucilagem e o ajuste dos dados aos modelos de cinética de secagem presentes na literatura. Foram pré-determinados os modelos: Lewis, Brooker, Page, Overhults e Mancini. Os procedimentos de secagem foram realizados em um protótipo de leito fixo e camada fina, com fluxo ascendente de ar variando-se três níveis de temperatura 30, 60 e 80 ± 3°C e dois níveis de velocidades do ar: 7,0 e 9,0 m/s. Pode-se verificar que, a influência da temperatura foi mais significativa que a velocidade do ar de secagem na operação tanto para o bagaço de laranja como para as sementes de mamão papaia com mucilagem. Os ajustes aos modelos foram feitos através de estimação não linear por mínimos quadrados e a escolha em critérios estatísticos. Os modelos de Page e Overhults foram os que melhor se ajustaram para ambos os casos. As taxas de secagem obtidas mostraram que o processo difusivo controlou o processo de secagem em consonância com a literatura.*

## 1. INTRODUÇÃO

A laranja é uma das frutas mais conhecidas, sendo o suco seu principal produto na indústria brasileira; além deste são obtidos os óleos essenciais, o limoneno e o farelo de polpa cítrica, subprodutos de elevado valor comercial obtidos do bagaço da laranja que é um resíduo sólido industrial. O estudo de alternativas para destino desse resíduo se torna interessante tanto ambiental, quanto economicamente. Segundo Fiorentin et al. (2010), de acordo com a variedade a laranja pode chegar a ter 46% de bagaço úmido, o destino principal deste resíduo, é a alimentação animal.

Devido à grande importância industrial, comercial e ambiental da secagem do bagaço de laranja e do interesse técnico científico da secagem de semente de mamão com mucilagem, este trabalho tem por objetivo a determinação da cinética de secagem do bagaço de laranja e da semente de mamão com mucilagem em camada fina e leito fixo, e posteriormente ajuste dos dados experimentais a um ou mais modelos matemáticos de cinética de secagem presentes na literatura e a determinação das respectivas taxas de secagem.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho foram usados bagaço de laranja resíduo da produção de suco, e sementes de mamão papaia retiradas da fruta “in natura” em estado de maturação fisiológica. Para secagem do bagaço de laranja, optou-se por um tamanho médio das partículas de  $1\text{cm}^2$ , com espessura de aproximadamente 1 cm, que foram cortadas com faca de material inox. Para o mamão papaia, a retirada das sementes foi feita manualmente, de acordo com o procedimento proposto por Prado (2004) apud Alvarenga (1986). O conjunto de secagem como observado na Figura 01, é constituído de um secador que apresenta uma chave seletora que permite variações de temperatura e velocidade. A temperatura e a velocidade do ar foram aferidas após a estabilização das suas condições através de um termo-anemômetro. O duto de condução do ar permite o trajeto desde a saída do secador, até a célula de secagem, escoando ar pela mesma, não possuindo nenhuma isolamento térmica.

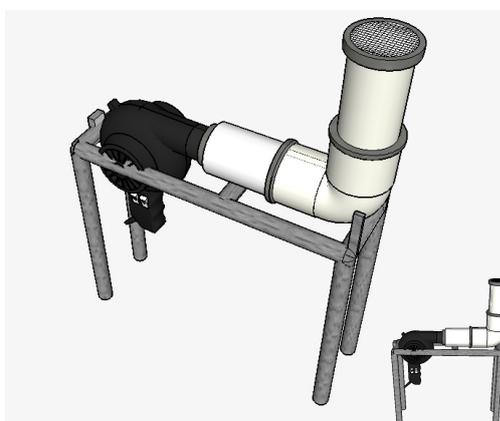


Figura 01 – Disposição geral do equipamento de secagem

A umidade relativa do ar foi determinada através de um termo-higrômetro. A célula de secagem, foi conformada em ferro, com 5,3 cm de diâmetro interno e profundidade de 1 cm, é constituída por um prato inferior, onde são depositadas as amostras e um prato superior que se fixa a parte inferior por uma rosca. Para se determinar a umidade das partículas, utilizou-se uma estufa de bandeja perfurada com circulação e renovação.

## 2.1 Isotermas de secagem

Determinou-se a umidade de equilíbrio ( $Y_{eq}$ ) do bagaço de laranja, a partir do modelo matemático de Sabbah (Equação 1) que mais se ajustou segundo Fiorentin et al. (2010).

$$Y_{eq} = K \frac{(UR)^B}{T^C} \quad (1)$$

Considerando os parâmetros observados por Fiorentin et al. (2010) observaram-se variações não significativas para as umidades de equilíbrio ( $Y_{eq}$ ), para os diferentes valores de constantes aplicados ao modelo de Sabbah, adotando-se a Equação 2 para cálculo da umidade de equilíbrio ( $Y_{eq}$ ), para o bagaço de laranja neste trabalho.

$$Y_{eq} = 0,11 \frac{(UR)^{6,03}}{T^{(-0,34)}} \quad (2)$$

Para as sementes de mamão papaia com mucilagem, utilizou-se a equação de Halsey modificada (Equação 3) para cálculo da umidade de equilíbrio, pois foi o modelo matemático que mais se ajustou para determinação de ( $Y_{eq}$ ) das sementes de mamão papaia com mucilagem segundo Prado (2004).

$$Y_{eq} = \left[ \frac{-\exp(-1,99 \times 10^{-2} \cdot T_{\bar{e}} + 4,92)}{\ln(UR)} \right]^{1/2,29} \quad (3)$$

Os dados cinéticos foram obtidos através das Equações 4 e 5, respectivamente. Sendo  $Y_0$  a umidade inicial em base seca das amostras, e  $Y$  a umidade em base seca para cada tempo do ensaio e  $YR$  a umidade adimensional.

$$Y = \frac{M_{úmida} - M_{sólidos\ secos}}{M_{sólidos\ secos}} \quad (4)$$

$$YR = \frac{Y - Y_{eq}}{Y_0 - Y_{eq}} \quad (5)$$

Para a escolha dos modelos matemáticos que mais se ajustaram ao comportamento cinético dos

materiais secos foram observados a razão F, distribuição residual, coeficientes de determinação  $R^2$  e erro médio, sendo os modelos de Page (Equação 6) e Overhults (Equação 7) os que melhor se ajustaram. Para a observação da taxa de secagem, derivou-se as equações dos modelos matemáticos que mais se ajustaram, Page e Overhults, respectivamente.

$$YR = \exp(-Kt^n) \quad \text{Onde} \quad K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right) \quad (6)$$

$$YR = \exp[-(Kt)^n] \quad \text{Onde} \quad K = \exp\left(A + \frac{B}{T_f}\right) \quad (7)$$

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Análise do comportamento cinético a velocidade constante

Para análise da influência da temperatura, estão apresentadas as curvas de secagem, mantidas a velocidade constante de 9,0 m/s e com a variação de três faixas temperaturas 30, 60 e 80° C ± 3° C para o bagaço de laranja e sementes de mamão papaia com mucilagem respectivamente.

Nas figuras 02 e 03, observa-se que em temperaturas mais elevadas a amostra de bagaço de laranja e mamão tendem a perder mais água para o meio, no início do processo de secagem, quando comparadas a temperaturas inferiores, como o que se visualiza nas temperaturas de 27,4°C e 32,8°C, onde não há uma perda significativa de umidade quando relacionada às outras temperaturas.

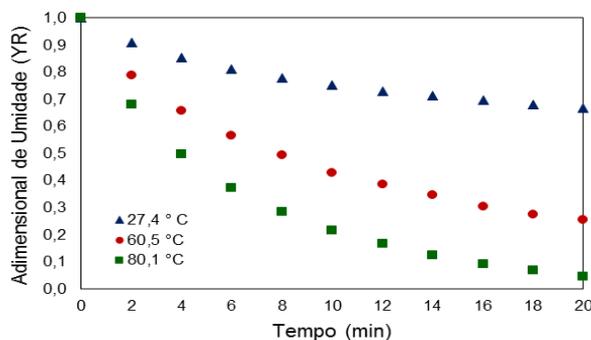


Figura 02 – Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na temperatura do ar de secagem para o bagaço de laranja a velocidade constante de 9,0 ms<sup>-1</sup>.

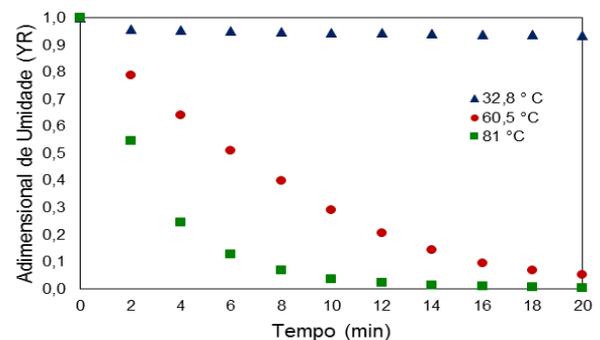


Figura 03 – Umidade adimensional em função do tempo, parametrizada na temperatura do ar de secagem para as sementes de mamão papaia com mucilagem à velocidade constante de 9,0 ms<sup>-1</sup>.

Dessa forma em operações de secagem usando temperaturas elevadas o processo torna-se mais rápido. Porém deve-se considerar que de acordo com as características em temperaturas muito altas o material a ser seco, sofre mudanças em suas propriedades. Para o bagaço de laranja, segundo Fiorentin et al. (2010), por exemplo, deve-se utilizar temperaturas de secagem inferiores a 50° C.

Segundo Rodrigues (2002) quase sempre o único mecanismo de transferência de calor e massa observado no processo de secagem de materiais agrícolas é o difusivo, pois o período de taxa constante onde o mecanismo de transferência de calor e massa é por convecção é muito rápido, fenômeno este observado nas figuras 02 e 03, onde, tanto para o bagaço de laranja como para as sementes de mamão papaia com mucilagem, o comportamento convectivo de transferência de calor e massa foi observado até os dois minutos do processo de secagem, sendo observado em todo o tempo restante da secagem o comportamento difusivo de transferência de calor e massa, período de taxa decrescente na cinética de secagem das respectivas amostras.

Gouveia (2003), afirmou que a cinética de secagem é fortemente influenciada pela temperatura e a aplicação de temperaturas elevadas reduz o tempo necessário para secagem, comportamento similar também foi observado no trabalho de Moura et al. (2001).

### 3.2 Análise do comportamento cinético a temperatura constante

Para análise da influência da velocidade do ar de secagem no experimento fixou-se uma temperatura de  $60,5^{\circ}\text{C}$ , e variou-se duas velocidades do ar de secagem  $7,0$  e  $9,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Observou-se que a velocidade teve uma influência menor comparativamente à temperatura de secagem.

As figuras 04 e 05 demonstraram comportamento semelhante, elas mostram a perda de umidade das amostras (bagaço de laranja e sementes de mamão papaia com mucilagem).

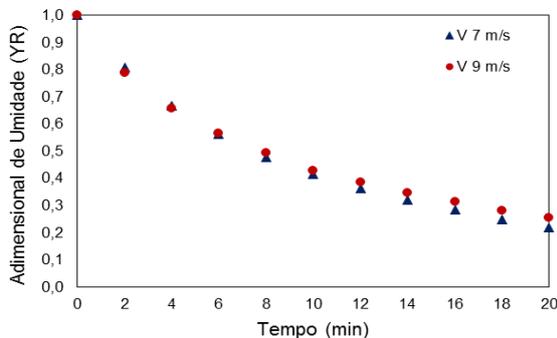


Figura 04 – Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade do ar de secagem para o bagaço de laranja a uma temperatura constante de  $60,5^{\circ}\text{C}$ .

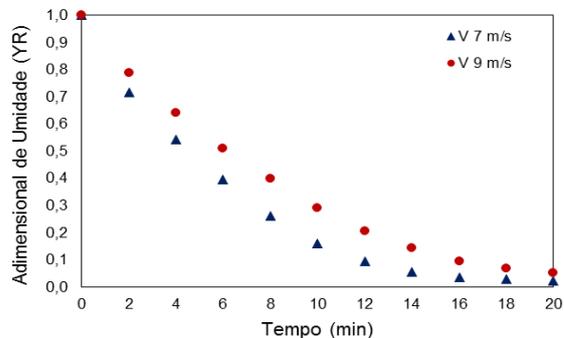


Figura 05 – Umidade adimensional em função do tempo parametrizada na velocidade do ar de secagem para as sementes de mamão papaia com mucilagem a uma temperatura constante de  $60,5^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3 Ajuste aos modelos cinéticos de secagem

Com o auxílio do “software” STATISTICA 8.0 foram obtidos os parâmetros das equações de secagem através de estimação não linear por mínimos quadrados pelo método Simplex e Quasi-Newton, de acordo com a metodologia utilizada por Oliveira Júnior (2003), utilizando como conjunto de dados as triplicatas de cada ensaio.

O teste F, realizado para todos os modelos matemáticos confirmam a veracidade dos modelos. Todos os valores da razão F calculados foram superiores aos F tabelados, sendo a menor variação da razão de  $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}}$  observado nos ajustes ao modelo matemático de Mancini, tanto para o bagaço de laranja como para as sementes de mamão papaia com mucilagem, na ordem de 12,03 vezes superiores ao mínimo para a hipótese ser rejeitada, e os maiores valores obtidos foram pelos modelos matemáticos de Overhults e Page para as sementes de mamão papaia com mucilagem, sendo aproximadamente 7166 e 3704 vezes respectivamente superior ao valor de F mínimo para validação do modelo, porém para escolha do melhor modelo, uma vez que todos foram considerados válidos, outros coeficientes foram observados, para definir os modelos que melhor se ajustaram.

Na tabela 01, estão apresentados os resultados obtidos nos ajustes aos modelos matemáticos presentes na literatura para a secagem de sementes de mamão papaia a velocidade constante.

Os modelos que mais se ajustaram aos dados experimentais tanto para o conjunto de amostras do bagaço de laranja quanto para as sementes de mamão papaia com mucilagem foram os modelos

Tabela 01 – Resultados obtidos por estimação não linear para os modelos matemáticos de cinética de secagem para as sementes de mamão papaya com mucilagem a velocidade constante de  $9 \text{ m.s}^{-1}$

EQUAÇÃO	PARÂMETROS	VALOR	R <sup>2</sup>	ERRO MÉDIO (SE)	RAZÃO F
LEWIS	a	6,28	0,994	0,29	18512,91
	b	237,27			
BROOKER	a	6,35	0,995	0,21	17746,92
	b	238,12			
	c	1,00			
PAGE	a	0,94	0,996	0,18	11517,92
	b	74,46			
	n	0,97			
OVERHULTS	a	1,64	0,996	0,18	22286,19
	b	-225,35			
	n	1,12			
MANCINI	a1	-3,11	0,938	0,58	948,44
	b1	2,77			
	a2	0,11			
	b2	0,00			

representados pela equação de Page (Equação 6) e Overhults (Equação 7), que apresentaram coeficientes de determinação R<sup>2</sup> mais próximo da unidade e menor erro médio. Ambos os modelos também apresentaram distribuição residual normal e homocedasticidade, ou seja, uma variabilidade constante de dados atendendo as pressuposições dos mesmos.

As figuras 06 e 07 apresentam as curvas de secagem experimentais e teóricas para as amostras de bagaço de laranja de sementes de mamão papaia com mucilagem, tanto para velocidade constante do ar de secagem quanto para temperatura constante.

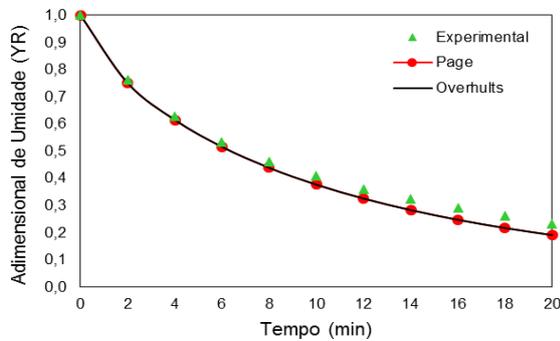


Figura 06 – YR em função do tempo para bagaço de laranja (Page e Overhults), a velocidade constante  $V=9\text{ m.s}^{-1}$ ;  $T=27,4, 60,5$  e  $80,1^{\circ}\text{C}$ .

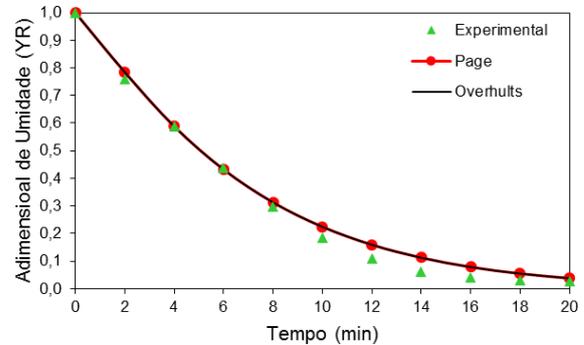


Figura 07 – YR em função do tempo para sementes de mamão papaia com mucilagem, (Page e Overhults), a  $T=60,5^{\circ}\text{C}$  e  $V=7,0$  e  $9,0\text{ m.s}^{-1}$ .

Nota-se que os valores obtidos para os ajustes através dos modelos matemáticos apresentaram boa concordância aos valores obtidos experimentalmente.

### 3.4 Taxa de Secagem

Em função dos ajustes aos modelos de Page e Overhults, foram obtidas as respectivas taxas de secagem. Pode se observar através das figuras 08, 09, 10 e 11, que o processo de secagem foi dominado pelo mecanismo difusivo, sendo o processo convectivo muito rápido. Resultado semelhante foi obtido por Rodrigues (2002) para materiais agrícolas.

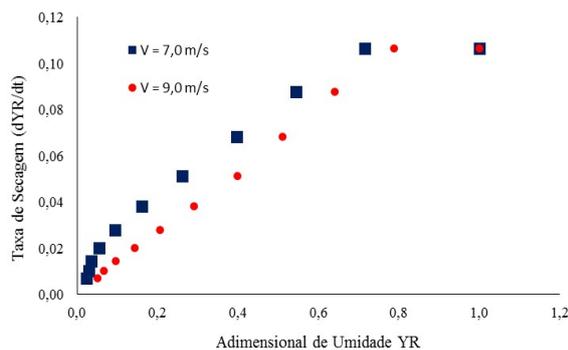


Figura 08 – Taxa de secagem das sementes de mamão papaia com mucilagem à temperatura constante de  $60,5^{\circ}\text{C}$  através do modelo matemático de Page.

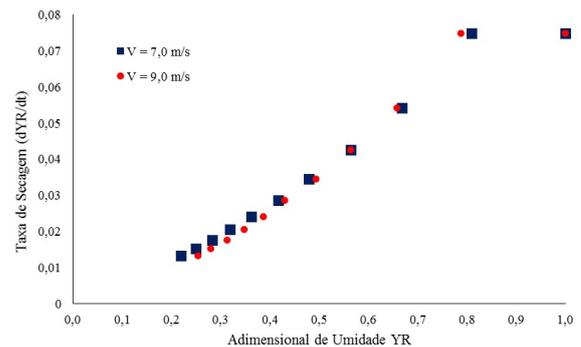


Figura 09 – Taxa de secagem do bagaço de laranja à temperatura constante de  $60,5^{\circ}\text{C}$  através do modelo matemático de Page.

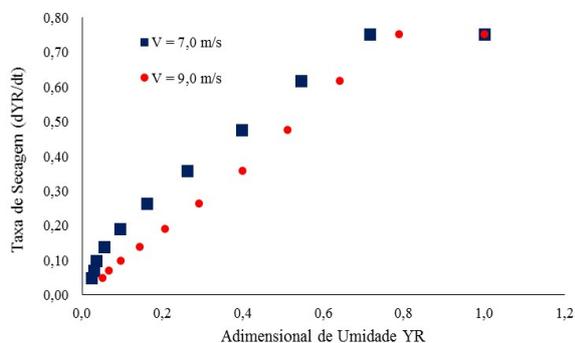


Figura 10 – Taxa de secagem das sementes de mamão papaia com mucilagem à temperatura constante de 60,5 °C através do modelo matemático de Overhults.

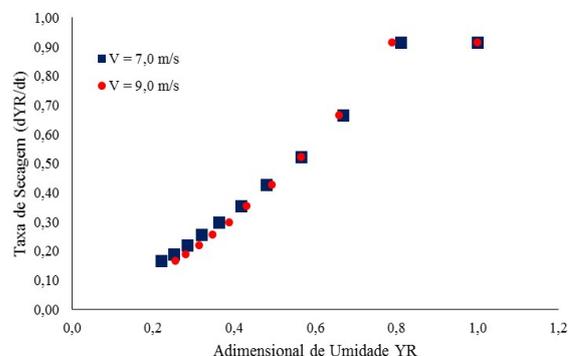


Figura 11 – Taxa de secagem do bagaço de laranja à temperatura constante de 60,5 °C através do modelo matemático de Overhults.

A influência da velocidade no processo de secagem foi pequena como também foi observado por Gouveia (2003).

#### 4. CONCLUSÃO

Os modelos de Page e Overhults podem ser utilizados com boa precisão na previsão dos dados cinéticos de ambos os frutos analisados.

Constatou-se que na cinética de secagem a influência da temperatura foi significativa e a velocidade do ar de secagem não demonstrou relevante influência para os frutos em questão.

O bagaço de laranja bem como as sementes de mamão papaia com mucilagem apresentaram um período muito rápido de secagem à taxa constante, evidenciando que é a difusão interna, o mecanismo que controla a secagem.

#### 5. REFERÊNCIAS

FIORENTIN, Leila Denise.; MENON, Bruna. T.; ALVES, João Adriano.; BARROS, Sueli Teresa, D.; PEREIRA, Nehemias. C.; MÓDENES, Aparecido Nivaldo. Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço de laranja. *Revista Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 32, n. 2 p. 147-152, 2010.

GOUVEIA, Josivanda, P. G.; ALMEIDA, Francisco, A. C.; FARIAS, Eliana, S.; SILVA, Manassés, M.; CHAVES, Maria da Conceição, V.; REIS, Lígia, S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, Especial, n.1, p. 65-68, 2003.

MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F. A. C.; GOUVEIA, J. P. G.; SILVA, M. M.; FIGUEIREDO NETO, A. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de caju. *Anais...* In: Congresso Brasileiro de Engenharia agrícola, 30, 2001, Pelotas, 2001.



OLIVEIRA JUNIOR, A.B. **Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibro-fluidizado.** 2003. 202f. Dissertação de Mestrado – UFSCAR, São Carlos.

PRADO, M. M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem.** 2004. 162 f. Tese de Doutorado – UFSCAR, São Carlos.

RODRIGUES, Maria Elessandra A.; ALMEIDA, Franciso A. C.; GOUVEIA, Josivanda P. G.; SILVA, Manassés M. Avaliação da temperatura e velocidade do ar de secagem na de goiaba. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.2, p. 141-147, 2002.

PROMOÇÃO



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO

