



X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Universidade Severino Sombra
Vassouras – RJ – Brasil

ANÁLISE DA SECAGEM CONVECTIVA DE FATIAS DE BERINJELA

TSUDA*¹, J.; CARVALHO¹, A.C.B.; COSTA², A.B.S. e FREIRE³, F. B.

¹Aluna do DEQ/UFSCar ²Doutoranda da DEQ/UFSCar ³Docente do DEQ/UFSCar
Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal São Carlos
Endereço – Rodovia Washington Luiz, Km 235 – São Carlos, SP – CEP 13565-905,
e-mail: fabiobefreire@gmail.com

RESUMO –A secagem é uma operação unitária que pode promover alterações na estrutura de materiais termos-sensíveis, como mudança em seu volume, superfície e coloração. Com a finalidade de analisar as mudanças que ocorrem na secagem de um material biológico, o objetivo do presente trabalho foi estudar os fenômenos envolvidos durante a secagem convectiva, com escoamento de ar paralelo a amostra, de fatias de berinjela. Durante a secagem foi investigada a influência que as variáveis de processo, temperatura (40°C, 55°C e 70°C) e velocidade do ar (1,0; 1,5; e 2,0 m/s), podem apresentar na cor das superfícies das fatias, na cinética de secagem e na cinética de encolhimento do material. Tanto a cinética de secagem, como a de encolhimento, foram analisadas através de correlações já existentes na literatura. Com os resultados obtidos ao final do processo, foi possível observar que as superfícies das fatias de berinjela não sofreram alterações relevantes em sua coloração. Dos modelos empíricos e semi-empíricos de secagem selecionados, como esperado, o modelo de Page foi o que melhor ajustou aos dados experimentais. Dentre os modelos de cinética de encolhimento encontrados na literatura, foram utilizados apenas os modelos com dois parâmetros, pois estes são mais simples e representaram bem o comportamento do encolhimento da berinjela.

Palavras chave: cinética de secagem, encolhimento, modelos empíricos, cor.

INTRODUÇÃO

A berinjela é um fruto que pertence à família das Solanaceae, com um sabor amargo e de polpa fibrosa e elástica. É um alimento muito indicado para a prevenção e tratamento de diabetes, pois melhora a tolerância à glicose, além de contribuir para a redução das taxas de colesterol LDL da pessoa que a consome (Deveri *et al.* 2002).

No entanto, a berinjela possui um alto teor de umidade, podendo apresentar até 94% b.s., que proporciona uma vida útil muito

limitada. Uma alternativa para favorecer a estabilidade do produto e prolongar a vida útil é através da secagem (Ertekin e Yaldiz, 2004; Reis *et al.* 2006; Puig *et al.* 2012).

A secagem é uma operação complexa que envolve, simultaneamente, fenômenos de transferência de calor e massa durante a remoção da umidade. Esta complexidade no processo é referente, além da transferência de calor e massa, às mudanças provocadas no volume. Existem matérias primas, como materiais alimentícios, que apresentam mais de um fator que são alterados durante a operação,

como estrutura, cor, sabor e composição química. Baseado nas considerações citadas, verifica-se que os estudos sobre a secagem necessitam, além do conhecimento característico do processo, analisar a influência que as variáveis do processo de secagem podem apresentar nas características físicas do material (Doymaz e Gol, 2011; Puig *et al.* 2011; Sturm *et al.* 2014, Russo *et al.* 2013)

Assim, o objetivo do presente trabalho foi estudar a secagem de fatias de berinjela durante o processo, avaliando a variação de umidade em função do tempo. Verificaram-se também os efeitos que a temperatura e a velocidade do ar poderão proporcionar na estrutura das fatias de berinjela. Além disso, foram realizados ajustes de modelos empíricos de cinética de secagem e de cinética de encolhimento aos dados experimentais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Material

O material usado nos experimentos foram frutos de berinjelas sadios e de tamanhos semelhantes, que foram adquiridos no comércio de São Carlos – SP.

Para a realização dos experimentos as fatias foram cortadas na horizontal, como é apresentado na Figura 1. Depois de cortada, as cascas das fatias eram removidas, utilizando somente as polpas nos ensaios experimentais.



Figura 1 – Fatia de berinjela utilizada no experimento.

Metodologia experimental

A unidade para a realização dos ensaios foi um secador convectivo com escoamento forçado de ar, paralelo à amostra, de acordo com o esquema apresentado na figura 2.

Os experimentos conduzidos neste secador foram realizados em diferentes condições de temperatura (40°C, 55°C e 70°C) e velocidades (1,0; 1,5 e 2,0 m/s) do ar,

combinadas de acordo com o planejamento fatorial completo, com 3² experimentos.

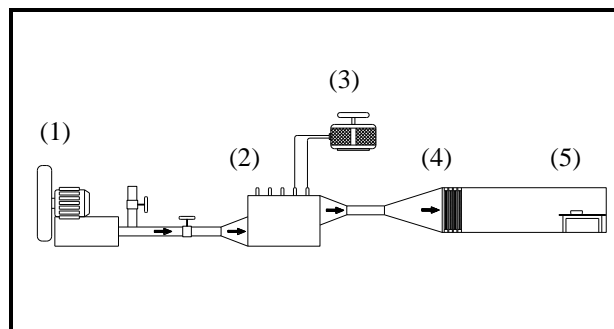


Figura 2 – Secador convectivo: soprador (1), trocador de calor (2), variador de voltagem (3), sistema de homogeneização (4), câmara de secagem (5).

Para avaliar a cinética de secagem, as amostras foram pesadas em intervalos de tempo de 10 minutos. Quando a massa da amostra não variava mais, os experimentos eram encerrados e as amostras, então, levadas a uma estufa a 105°C ± 3°C por um período de 24 horas, para que fossem determinadas as massas secas.

Com relação ao encolhimento, analisou-se o quanto à espessura da fatia diminuiu durante a secagem. Para realizar esta análise, utilizou-se um paquímetro digital da marca Rotarez, em que foram feitas quatro medidas em diferentes posições da fatia e calculado o valor médio da espessura. Os mesmos intervalos de tempo utilizados para cinética foram utilizados para verificar o encolhimento.

Antes das fatias serem colocadas na estufa, realizou-se uma análise das cores das superfícies da fatia com o auxílio de um colorímetro modelo CM-5 da marca Konica Minolta, em que, primeiramente, foram determinados os valores dos parâmetros L*, a* e b*, em três posições diferentes da fatia, e, em seguida, calculou-se o valor médio.

Com os dados experimentais de razão de umidade em função do tempo, modelos empíricos e semi-empíricos de secagem foram ajustados através da análise de regressão, com o auxílio da rotina solver presente no software Microsoft Excel®, e os parâmetros determinados de acordo com o método dos mínimos quadrados. Dentre os modelos existentes, os modelos selecionados para

realizar os ajustes são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos empíricos e semi-empíricos de secagem.

Modelo	Equação	
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(1)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(2)
Henderson & Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(3)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(4)
Two-terms	$MR = a \exp(-kt^n) + b \exp(-k_1 t)$	(5)

Como critério para determinar o melhor modelo, teve-se como base os valores do coeficiente de determinação, da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e do erro quadrado médio (RME). Os modelos empíricos que apresentaram os maiores valores de R^2 e os menores valores da soma dos quadrados dos resíduos e dos erros quadrados médios corresponderam aos modelos que melhor se ajustaram aos dados.

Utilizando o mesmo “software” e os mesmos critérios anteriores, foi realizado um ajuste dos modelos empíricos de encolhimento para os dados da espessura relativa, em função da umidade em base seca. Os modelos que foram ajustados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos empíricos de encolhimento.

Modelos	
$E/E_0 = aX + b$	(6)
$E/E_0 = a + b \exp(ct)$	(7)
$E/E_0 = a \exp(bX / X_0)$	(8)
$E/E_0 = 0,16 + 0,816(X / X_0) + 0,022 \exp(0,018 / X + 0,025) + \pi(1 - X / X_0)$	(9)
$p_1 = 0,209 - p_2;$	
$p_2 = 0,966 / (X_0 + 0,796).$	

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Alguns resultados de razão de umidade em função do tempo são apresentados nas Figuras 3 e 4. Optou-se por apresentar apenas as condições limites máximas e mínimas, visto

que as condições intermediárias também vão estar contidas nas análises.

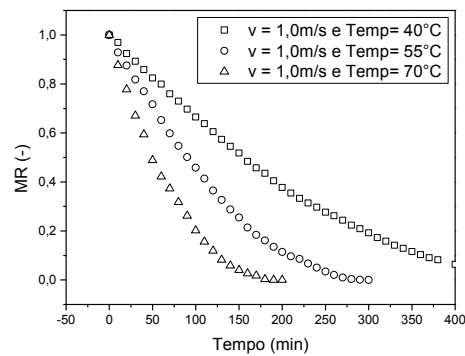


Figura 3 – Razão de umidade em função do tempo para os ensaios com velocidade de 1,0 m/s, parametrizado nas temperaturas.

Os resultados apresentados na Figura 3 eram esperados, pois mostram que para uma dada velocidade do ar, o aumento da temperatura reduziu o tempo para que a amostra alcançasse o equilíbrio.

Na Figura 4a pode-se observar que, na temperatura de 40°C, a influência da velocidade do ar nos ensaios foi apenas para a velocidade de 1,0 m/s, enquanto que para as condições de 1,5 e 2,0 m/s, os ensaios apresentaram intervalos de tempo semelhantes. Isso indica que, para velocidades acima de 1,5 m/s, esta variável deixa de influenciar no processo. Ao analisar a Figura 4b, que corresponde aos ensaios referentes à maior temperatura abordada, verifica-se que a influência da velocidade do ar não foi expressiva. Com estes resultados, pode-se considerar que, ao utilizar elevadas temperaturas na secagem, a taxa com que a umidade na superfície da amostra é evaporada, é superior a taxa com que a umidade migra no interior da fatia para a superfície. Por este motivo que as curvas de secagem apresentaram resultados semelhantes durante os experimentos, independente da velocidade do ar.

Diante das análises obtidas, pode-se constatar que a resistência à transferência de massas se encontra principalmente no interior das fatias. Resultados semelhantes são encontrados por Sturn *et al.* 2014, Russo *et al.* 2013, Doymaz e Gol 2012, e é típico em materiais biológicos.

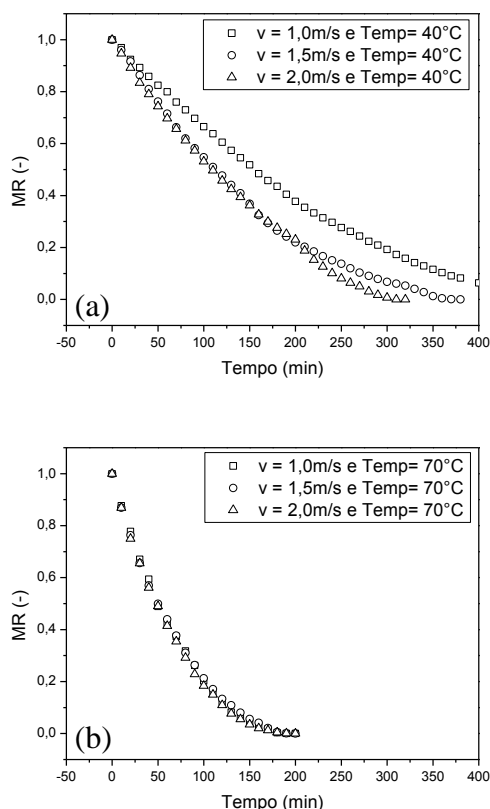


Figura 4 – Razão de umidade em função do tempo para os ensaios com temperatura de (a) 40°C e (b) 70°C, parametrizado nas velocidades do ar.

Com relação aos modelos ajustados, as análises estatísticas apresentaram os coeficientes de determinação $R^2 > 0,98$, a SQR $< 0,79$ e o EQM $< 0,0016$. No entanto, dos modelos selecionados, o que melhor ajustou os dados, de acordo com o critério utilizado, foi o modelo de Page. Os valores dos seus parâmetros ajustados e os valores de R^2 , SQR e EQM são apresentados na Tabela 3.

Para mostrar o bom ajuste do modelo Page nos dados experimentais, a Figura 5 apresenta algumas condições aleatórias, uma vez que todas as condições selecionadas obtiverem bons resultados.

Perante os resultados obtidos do comportamento da espessura da fatia durante o processo de secagem, foram apresentadas apenas algumas condições na Figura 6, visto que os comportamentos foram semelhantes para o restante das condições.

Tabela 3 – Parâmetros ajustados do modelo de Page e os valores estimados de R^2 , SQR e EQM.

Modelo de Page						
Veloc. (m/s)	Tem. (°C)	k (min ⁻ⁿ)	n	R ²	SQR	EQM
1,0	40	0,0009	1,3190	0,9972	0,0142	0,0003
1,0	55	0,0019	1,3183	0,9983	0,0060	0,0002
1,0	70	0,0052	1,2503	0,9959	0,0092	0,0004
1,5	40	0,0016	1,2997	0,9983	0,0067	0,0002
1,5	55	0,0018	1,2729	0,9973	0,0100	0,0003
1,5	70	0,0069	1,1841	0,9957	0,0091	0,0004
2,0	40	0,0024	1,2093	0,9984	0,0056	0,0002
2,0	55	0,0039	1,2472	0,9974	0,0076	0,0003
2,0	70	0,0063	1,2188	0,9962	0,0085	0,0004

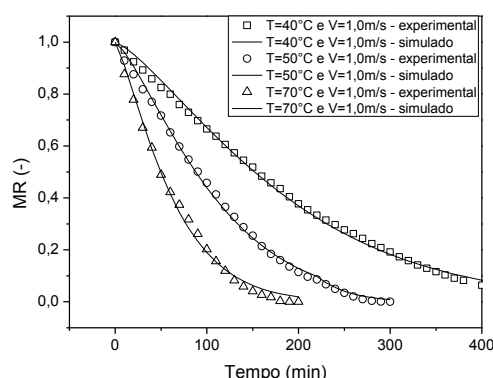


Figura 5 – Razão de umidade em função do tempo, experimental e simulada pelo modelo de Page, para a velocidade de 1,0m/s e diferentes temperaturas.

De acordo com a Figura 6a, observou-se que, para a velocidade de 1,0m/s, o encolhimento da espessura aumentou à medida que aumentou a temperatura do ar. Ao observar a Figura 6b, aparentemente, o início do encolhimento é o mesmo para os ensaios às temperaturas de 55° e 70°C. No entanto, a partir de 130 minutos, aproximadamente, a espessura apresentou comportamentos diferentes. Essa diferença do final das curvas será melhor investigada, onde será realizado um número maior de reproduções dos ensaios.

A partir desses resultados pode-se considerar que o encolhimento das fatias durante o processo de secagem é influenciado pelas variáveis de processo, tanto a temperatura como a velocidade do ar.

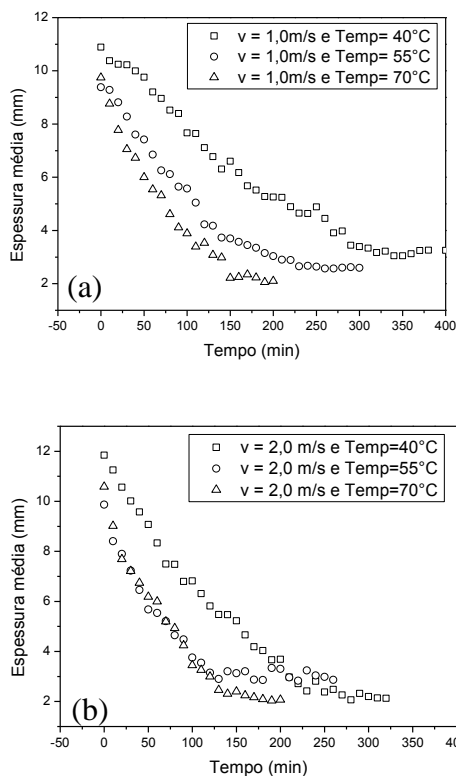


Figura 6 – Razão de umidade em função do tempo para os ensaios com velocidade de (a) 1,0 m/s e (b) 2,0 m/s, parametrizado nas temperaturas.

Com relação aos modelos de encolhimento ajustados, as análises estatísticas apresentaram coeficientes de determinação $R^2 > 0,93$, a $SQR < 0,69$ e o $EQM < 0,0386$. Entretanto, baseados nos critérios, apenas dois modelos se destacaram. Por isso selecionou-se o modelo que apresentava o menor número de constantes ajustáveis para representar o comportamento. Logo, a equação 6 representou o modelo que melhor ajustou os dados e os valores obtidos dos coeficientes ajustados, dos R^2 , das SQR e dos EQM são apresentados na Tabela 4.

Visto que, os resultados obtidos pelo modelo selecionado, foram semelhantes para todos os ensaios, apenas algumas condições aleatórias foram apresentadas. A Figura 7 demonstra o comportamento da espessura relativa em função da umidade em base seca, dos dados experimentais e simulados. A partir deste gráfico foi verificado que o modelo representou, de forma satisfatória, o encolhimento.

Tabela 4 – Parâmetros ajustados do modelo de encolhimento e os valores estimados de R^2 , SQR e EQM .

$E/E_0 = aX + b$						
Veloc.	Tem.	a	b	R^2	SQR	EQM
1,0m/s	40°C	0,0623	0,1698	0,9972	0,0142	0,0003
1,0m/s	55°C	0,0572	0,2313	0,9983	0,0060	0,0002
1,0m/s	70°C	0,0549	0,2259	0,9959	0,0092	0,0004
1,5m/s	40°C	0,0551	0,0915	0,9983	0,0067	0,0002
1,5m/s	55°C	0,0570	0,2135	0,9973	0,0100	0,0003
1,5m/s	70°C	0,0509	0,1849	0,9957	0,0091	0,0004
2,0m/s	40°C	0,0600	0,1300	0,9984	0,0056	0,0002
2,0m/s	55°C	0,0535	0,2418	0,9974	0,0076	0,0003
2,0m/s	70°C	0,0562	0,1934	0,9962	0,0085	0,0004

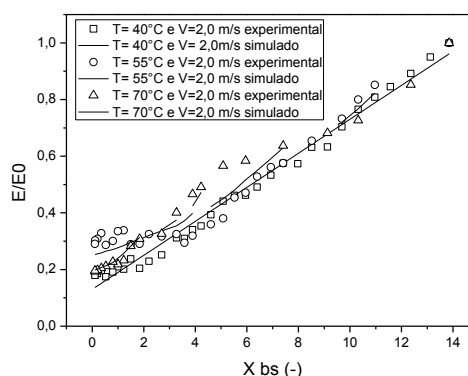


Figura 7 - Espessura relativa em função da umidade, experimental e simulada pelo modelo de encolhimento considerado, para a velocidade de 2,0m/s e diferentes temperaturas.

As superfícies das fatias não apresentaram uma diferença expressiva em sua coloração, no final de todos os ensaios experimentais. Diante desse resultado, foram analisadas somente a coloração das fatias utilizadas nas condições limitantes. Com isso, os valores médios das propriedades de cor, para os ensaios realizados com 40°C - 1,0 m/s e 70°C - 2,0 m/s, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Médias das propriedades de cor L^* , a^* , b^* , C^* e h das fatias de berinjela.

Condições	L^*	a^*	b^*	C	h
40°C e 1,0m/s	72,61	4,78	26,43	26,79	1,39
70°C e 2,0m/s	74,69	3,89	24,73	25,03	1,41

A partir desses dados, pode-se observar que, mesmo para uma variação de temperatura 30°C, as coordenadas de cor da superfície das fatias não apresentaram uma variação expressiva. Estes valores encontrados são semelhantes ao de Reis *et al.* 2006, para a secagem convectiva de fatias de berinjela a 65°C.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que a resistência à transferência de massa é predominantemente interna. Dos modelos empíricos de cinética de secagem ajustados, o que melhor se adequou aos dados foi o modelo de Page. Com relação aos modelos empíricos de cinética de encolhimento, o modelo retratado na equação 6 foi o que melhor representou o comportamento do encolhimento das fatias. Ao analisar a cor das superfícies das fatias de berinjela, foi possível concluir que as condições utilizadas durante os experimentos de secagem, não influenciaram significativamente na cor da polpa.

NOMENCLATURA

a	Coeficiente empírico
a*	Parâmetro de cor de tonalidade esverdeada-avermelhada
b	Coeficiente empírico
b*	Parâmetro de cor da tonalidade azulada-amarelada
c	Coeficiente empírico
C	Saturação da cor
E	Espessura (mm)
EQM	Erro quadrado médio
h	Ângulo de tom
k	Constante cinética dos modelos empíricos e semi-empíricos (1/s)
L*	Luminosidade da cor
MR	Razão de umidade
n	Coeficiente empírico
R²	Coeficiente de correlação
SQR	Soma dos quadrados dos resíduos
t	Tempo (min)
T	Temperatura (°C)
v	Velocidade (m/s)
X	Teor de umidade em base seca

REFERÊNCIAS

- DEVERI, S. C. N. *et al.* (2002), “Efeito hipoglicêmico de rações à base de berinjela (*Solanum melongena*, L.) em ratos”. *Ciência e Tecnol. Aliment.* v.22, 2, 164-169
- DOYMAZ, I., GÖL, E. (2011), “Convective Drying Characteristics of Eggplant Slices”. *Journal of Food Process Engineering* 34, 1234–1252
- ERTEKIN, C., YALDIZ, O. (2004), “Drying of Eggplant and Selection of a Suitable Thin Layer Drying Model”. *Journal of Food Engineering*, 63, 349–359
- PUIG, A. *et al.* (2012), “Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying”. *Food and Bioprocess Processing*, 90, 624–632
- REIS, F. R. *et al.* (2006), “Efeito da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela”. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.8, 2, 163-169
- RUSO, P. *et al.* (2013), “The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant.” *Food and Bioprocess Processing*, 91, 249–256
- SHULYAK, V. A., IZOTOVA, L. A. (2009), “Shrinkage Kinetics during Convective Drying of Selected Berries.” *Drying Technology*, 27, 495–501
- STURM, B. *et al.* (2014), “Influence of process control strategies on drying kinetics, colour and shrinkage of air dried apples.” *Applied Thermal Engineering*, 62, 455-460

AGRADECIMENTOS

Um dos autores agradece ao CNPq pelo auxílio financeiro.