

MODELAGEM DE ENCOLHIMENTO VOLUMÉTRICO DURANTE A DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA DE BATATA-DOCE

J. R. J. JUNQUEIRA^{1*}, K. S. MENDONÇA¹, F. J. LOPES¹, R. E. MELLO JUNIOR¹, M. P. FILHO², J. L. G. CORRÊA¹

¹Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência dos Alimentos

²Fundação Indaiatubana de Educação e Cultura

*e-mail: jrenatojesus@hotmail.com

RESUMO

A desidratação osmótica (DO) é um pré-tratamento que consiste na imersão de alimentos em uma solução hipertônica, ocasionando dois fluxos em contracorrente, um de perda de água do alimento para a solução e um segundo de incorporação de sólidos da solução pelo alimento. Apesar de mencionado em vários estudos, o encolhimento que ocorre durante a DO não costuma ser tratado por modelos matemáticos. O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de encolhimento volumétrico de fatias de batata-doce durante 300 minutos de DO. Soluções de frutose, sorbitol e sacarose, com atividade de água de 0,900 foram utilizadas como agentes osmóticos. Seis modelos empíricos da literatura foram utilizados para descrever a redução do volume com relação ao teor de umidade. Um modelo exponencial foi proposto para ajuste da cinética de encolhimento volumétrico. Tanto os modelos que relacionam a variação de volume com o teor de umidade quanto o modelo para cinética de encolhimento apresentaram-se adequados com valores elevados de R^2 e baixos valores de χ^2 .

1 INTRODUÇÃO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.)) é uma das culturas mais importantes das regiões tropicais e subtropicais com diversas formas de uso. É considerada de grande importância econômico-social, participando do suprimento de calorias e minerais na alimentação humana, principalmente das populações de baixa renda (AZEVEDO et al., 2014).

A desidratação osmótica (DO) de um alimento consiste na remoção parcial de água de tecidos celulares pela sua imersão em uma solução hipertônica. Durante o processo osmótico, a transferência de massa ocorre principalmente em dois fluxos: a difusão de água do alimento para a solução osmótica e a incorporação de sólidos da solução para o alimento (CORRÊA et al., 2014).

DO é um dos pré-tratamentos mais empregados em processos na secagem de frutas e hortaliças, visando a obtenção de produtos com teores intermediários de umidade e atividade de água (FALADE; SHOGAOLU, 2010; MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011).

Alimentos submetidos à DO têm seu volume reduzido devido à diminuição do teor de umidade (CORRÊA et al., 2011). As modificações estruturais que ocorrem devido à desidratação são dependentes das propriedades do alimento e das condições do processo. O encolhimento que ocorre durante as etapas de secagem, afeta os parâmetros de transferência de calor e de massa, sendo um fator importante a ser considerado na modelagem (SEGUÍ et al., 2010; SEGUÍ et al., 2012).

O objetivo deste trabalho foi investigar o encolhimento volumétrico durante a desidratação osmótica de fatias de batata-doce. Empregou-se três diferentes agentes osmóticos (frutose, sorbitol e sacarose) em solução com atividade de água 0,900. Os dados experimentais de encolhimento volumétrico em função do teor de umidade foram ajustados por modelos da literatura e um modelo exponencial foi proposto para ajuste da cinética de encolhimento volumétrico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A batata-doce (*Ipomoea batatas* (L.) cv. Braslândia branca utilizada nos experimentos de desidratação osmótica foi adquirida no comércio local (Lavras, MG, Brasil) e armazenada em refrigerador à $7\pm 1^\circ\text{C}$. As raízes foram selecionadas com base em características uniformes de maturação, cor, diâmetro, firmeza e sem danos físicos, visando minimizar as diferenças na amostragem. O teor inicial de umidade foi de 0,70 kg de água/kg amostra, determinado pela secagem em estufa à vácuo a 70°C até peso constante (AOAC, 2007).

2.2 Preparação das Amostras e Solução Osmótica

As raízes foram lavadas, descascadas manualmente e cortadas em fatias de 2,00 cm de comprimento x 2,00 cm de largura x 0,50 cm de espessura, com auxílio de uma faca e um molde de aço inox, em seguida foram imersas por 3 minutos em solução aquosa de ácido cítrico 1% (p/v) para minimizar escurecimento enzimático (MENDONÇA et al., 2015).

As soluções osmóticas foram preparadas com água destilada e os agentes osmóticos empregados foram frutose, sorbitol e sacarose comerciais. A concentração e o peso molecular dos agentes estão

apresentados na tabela 1. A atividade de água (a_w) das soluções foi $0,900\pm 0,003$.

Tabela 1 - Peso molecular (P.M.) dos agentes osmóticos e concentração das soluções

Agente osmótico	P.M. [kg kmol ⁻¹]	Concentração [°Brix]
Frutose	180,16	52,1
Sorbitol	182,17	52,4
Sacarose	342,29	60,0

2.3 Desidratação Osmótica (DO)

Os experimentos de DO foram realizados pela imersão das amostras em erlenmeyers de 100 mL contendo a solução osmótica na proporção raiz:solução de 1:10 (p/p). Esta proporção alimento:solução foi utilizada para evitar alterações significativas na solução osmótica (VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2014). Os erlenmeyers foram codificados para identificação das amostras durante a DO. Os experimentos foram realizados à pressão atmosférica e temperatura de $30 \pm 0,5^\circ\text{C}$. A temperatura foi mantida constante em uma câmara de controle de temperatura (ELETROlab, EL 111/4, São Paulo, Brasil). Os experimentos foram realizados em quintuplicata e o valor médio, reportado.

A determinação da variação de volume das amostras foi feita com a remoção das mesmas em tempos pré-determinados (15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240 e 300 minutos) para medidas de área e espessura, com retorno das amostras à solução após as medições.

A determinação do teor de umidade das amostras foi conduzida em paralelo com a retirada de amostras em cada tempo pré-determinado, de acordo com o método AOAC 934.06 (AOAC, 2007).

2.4 Análises Analíticas

A área das amostras foi determinada através de análise de imagem com auxílio do

software Image J[®] 1.45s. O software fornece a área da amostra pela conversão dos pixels na imagem em dimensões reais, a partir de uma escala conhecida (LOPES, 2013). A espessura das amostras foi medida em cinco pontos distintos com auxílio de um paquímetro digital calibrado (Western, modelo DC-6, China) e tomada a média aritmética das medidas.

O volume das amostras foi obtido pela multiplicação da área superficial fotografada pela espessura média.

O encolhimento foi relacionado ao volume adimensional, β , determinado pela razão entre o volume da amostra desidratada,

V pelo volume da amostra fresca, V_0 conforme Equação 1:

$$\beta = \frac{V}{V_0} \quad (1)$$

2.5 Modelagem do Encolhimento

2.5.1 Encolhimento em Função do Teor de Umidade

Os modelos da literatura apresentados na Tabela 2 foram utilizados para ajustar a relação entre o encolhimento e o teor de umidade das amostras.

Tabela 2 – Modelos matemáticos aplicados à predição do encolhimento volumétrico (β) de batata-doce com relação ao teor de umidade (X)

Equação: $\beta = V/V_0$	Referências
$\beta = 1 - a(X - X_0)$	Yaldiz e Ertekin (2001) (2)
$\beta = 1 - a(1 - \exp(b(X - X_0)))$	Yaldiz, Ertekin e Uzun (2001) (3)
$\beta = 1/(a + b \exp(X))$	Ertekin e Yaldiz (2004) (4)
$\beta = 1 - a(1 - \exp(b(X - X_0)))$	Ratti (1994) (5)
$\beta = a + b(X - X_0) + c \exp(d(X/X_0))$	Lozano, Rotstein e Urbicain (1983) (6)
$\beta = a + bX + cX^2 + dX^3$	Ratti (1994) (7)

2.5.2 Cinética de Encolhimento

Um modelo exponencial relacionando o encolhimento e o tempo do processo também foi proposto no presente trabalho.

A formulação do modelo foi feita considerando-se que a grande maioria dos fenômenos que envolvem cinéticas de materiais biológicos apresentam perfis exponenciais.

Desta forma, o modelo é uma adaptação do modelo de Page (1949) para o encolhimento, apresentado pela Equação 8.

$$\beta = \exp(-kt^n) \quad (8)$$

Onde: k e n representam constantes do modelo e t representa o tempo do processo (minutos).

2.5.3 Análise Estatística

Uma análise de regressão não-linear foi conduzida para o ajuste aos modelos matemáticos, utilizando o métodos de Quasi-Newton, com auxílio do software Statistica 7.0[®] (Statsoft, Tulsa, OK).

O critério para avaliação da adequação do modelo aos dados experimentais de desidratação foi o coeficiente de correlação (R^2). Além disso, foram avaliados o valor de chi-quadrado (χ^2) e a raiz média do quadrado de erro (RMQE) para determinar a qualidade do ajuste. Esses parâmetros estatísticos podem ser calculados de acordo com as equações 9 e 10.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(I_{\text{exp},i} - I_{\text{pred},i})^2}{N - n'} \quad (9)$$

$$RMQE = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{\text{pre},i} - I_{\text{exp},i})^2 \right]} \quad (10)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Encolhimento em Função do Teor de Umidade

A Tabela 3 apresenta os parâmetros de ajuste de modelos que relacionam o volume adimensional ($\beta=V/V_0$) ao teor de umidade. Pela observação da tabela, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais de desidratação osmótica de batata-doce com maiores valores de R^2 e menores valores de χ^2 e RMQE foi o modelo polinomial proposto por Ratti (1994). Segundo os testes aplicados, o modelo apresentou os seguintes valores médios: $R^2 \geq 0,8971$, $\chi^2 \leq 0,00259$ e $RMQE \leq 0,0394$.

Tabela 3 - Relação entre encolhimento volumétrico e teor de umidade

	Constantes	Frutose	Sorbitol	Sacarose
Yaldiz e Ertekin (2001)	a	-0,2696	-0,2672	-0,3474
	R^2	0,7736	0,9820	0,9715
	χ^2	$3,79 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-4}$	$9,16 \times 10^{-4}$
	RMQE	$5,84 \times 10^{-2}$	$2,13 \times 10^{-2}$	$2,87 \times 10^{-2}$
Yaldiz, Ertekin e Uzun (2001)	a	500,000	499,992	499,999
	b	$5,4 \times 10^{-4}$	$5,35 \times 10^{-4}$	$6,95 \times 10^{-4}$
	R^2	0,7736	0,9822	0,9716
	χ^2	$4,27 \times 10^{-3}$	$5,69 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-3}$
	RMQE	$5,84 \times 10^{-2}$	$2,13 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-2}$
Ertekin e Yaldiz (2004)	a	1,6885	1,7580	2,1014
	b	-0,0394	-0,0449	-0,0627
	R^2	0,8212	0,7663	0,8618
	χ^2	$3,37 \times 10^{-3}$	$7,47 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-3}$
	RMQE	$5,19 \times 10^{-2}$	$7,73 \times 10^{-2}$	$6,33 \times 10^{-2}$
Ratti (1994)	a	0,2772	0,2001	0,0409

	b	0,6827	0,8211	0,9189
	R ²	0,7953	0,9860	0,9837
	χ^2	$3,86 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^{-4}$	$5,90 \times 10^{-4}$
	RMQE	$5,55 \times 10^{-2}$	$1,89 \times 10^{-2}$	$2,17 \times 10^{-2}$
Lozano, Rotstein e Urbicain (1983)	a	-11,1140	0,1669	0,0999
	b	-5,4188	0,9716	0,8085
	c	11,9473	-0,0127	0,0000
	d	0,3866	2,3278	10,7516
	R ²	0,8630	0,9876	0,9946
	χ^2	$3,44 \times 10^{-3}$	$5,25 \times 10^{-4}$	$2,60 \times 10^{-4}$
	RMQE	$4,54 \times 10^{-2}$	$1,77 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$
Ratti (1994)	a	3,4916	0,2809	-0,4187
	b	-4,3087	0,1074	1,1804
	c	2,0477	0,1138	-0,5049
	d	-0,2958	-0,0223	0,0919
	R ²	0,8971	0,9878	0,9968
	χ^2	$2,59 \times 10^{-3}$	$5,17 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$
	RMQE	$3,94 \times 10^{-2}$	$1,76 \times 10^{-2}$	$9,49 \times 10^{-3}$

Dentre os agentes osmóticos testados, a frutose foi o que apresentou pior ajuste (Tabela 3). De modo geral, o modelo proposto por Ertekin e Yaldiz (2004), foi o que apresentou menores valores de R² e maiores valores de χ^2 e RMQE.

Para os tratamentos com sacarose e sorbitol, todos os modelos propostos (exceto o modelo de Ertekin e Yaldiz (2004)) apresentaram valores de coeficiente de correlação maiores que 0,970, indicando bons ajustes aos modelos preditivos.

Toğrul e Ispir (2007) também propuseram a aplicação destes seis modelos na predição do encolhimento de damascos durante a desidratação osmótica com diferen-

tes agentes osmóticos (sacarose, frutose, glicose, maltodextrina e sorbitol), e concluíram que a maioria dos modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais.

3.2 Cinética de Encolhimento

O modelo exponencial proposto para correlacionar a redução no volume (adimensional) e o tempo (minutos), as constantes e os parâmetros estatísticos estão apresentados na Tabela 4.

O proposto modelo empírico apresentou bom ajuste aos dados experimentais quando a sacarose e o sorbitol foram empregados como

agentes osmóticos, com R^2 superiores a 0,98, χ^2 menores que 0,001 e RMQE menores que 0,04.

Tabela 4 - Constantes do modelo exponencial e parâmetros estatísticos

Modelo:	Frutose	Sorbitol	Sacarose
$\beta = \exp(-kt^n)$			
k	0,0651	0,0267	0,0625
n	0,3556	0,5826	0,4651
R^2	0,9109	0,9815	0,9901
χ^2	0,0015	0,0006	0,0003
RMQE	0,0348	0,0218	0,0161

Conclui-se que o modelo exponencial representa adequadamente o fenômeno de encolhimento para a desidratação osmótica para estes agentes. O tratamento em que a frutose foi empregada apresentou maiores valores de RMQE e baixos valores de R^2 , mas ainda foi possível explicar a relação existente entre a redução volumétrica e o tempo.

A abordagem exponencial para a cinética de desidratação conforme Page (1949) é uma das que fornece melhores ajustes (AZIZPOUR et al., 2014; TASIRIN et al., 2013). Como observado neste e em outros trabalhos (MAYOR; SERENO, 2004), o encolhimento está diretamente relacionado ao teor de umidade.

Desta forma, o uso da equação de Page (1949) na predição do encolhimento, levou a resultados bastante pertinentes.

4. CONCLUSÃO

O encolhimento em desidratação osmótica de fatias de batata-doce pode ser relacionado à variação do teor de umidade e sua cinética apresenta comportamento exponencial.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade
a_w	Atividade de água	-
a, b, c e d	Constantes dos modelos	-
I_{exp}	Valores obtidos experimentalmente	-
I_{pre}	Valores preditos pelos modelos	-
k	Coefficiente de secagem	-
N	Número de observações	-
n'	Número de constantes	-
t	Tempo	min
V_0	Volume da amostra fresca	cm ³
V	Volume da amostra desidratada	cm ³
X	Teor de umidade	kg de água/kg de amostra
X_0	Teor de umidade inicial	kg de água/kg de amostra
β	Volume adimensional	-

REFERÊNCIAS

A.O.A.C. (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS). Official methods of analysis. 18.ed. Washington: AOAC, 2007. 3000p.

ANTONIO, G. C. et al. Osmotic dehydration of sweet potato (*Ipomoea batatas*) in ternary solutions. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, p.696–701, 2008.

AZEVEDO, A. et al. Influence of harvest time and cultivation sites on the productivity and quality of sweet potato. **Horticultura Brasileira**, v. 32, p.21–27, 2014.

AZIZPOUR, M. et al. Optimization of Foaming Parameters and Investigating the Effects of Drying Temperature on the Foam-Mat Drying of Shrimp (*Penaeus indicus*). **Drying Technology**, v. 32, p.374–384, 2014.

CORRÊA, J. L. G. et al. Drying of pineapple by microwave-vacuum with osmotic pretreatment. **Drying Technology**, v. 29, p.1556–1561, 2011.

CORRÊA, J. L. G. et al. Optimisation of vacuum pulse osmotic dehydration of blanched pumpkin. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 49, p.2008–2014, 2014.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 63, p.349–359, 2004.

FALADE, K. O.; SHOGAOLU, O. T. Effect of pretreatments on air-drying pattern and color of dried pumpkin (*Cucurbita Maxima*) slices. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, p.1129–1147, 2010.

KATEKAWA, M. E.; SILVA, M. A. Drying rates in shrinking medium: case study of banana. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, p.561–569, 2007.

LOPES, F. J. **Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas**. 2013. 147 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, v. 48, p.1497–1553, 1983.

MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 103, p.29–37, 2011.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p.373–386, 2004.

MENDONÇA, K. S. et al. Optimization of osmotic dehydration of yacon slices. **Drying Technology**, *In Press, Accepted Manuscript*, 2015.

MOREIRA, R. et al. Water absorption, texture, and color kinetics of air-dried chestnuts during rehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p.584–594, 2008.

NAHIMANA, H. et al. Mass Transfer Modeling and Shrinkage Consideration during Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. **Food Reviews International**, v. 27, p.331–356, 2011.

OLIVER, L. et al. How to deal with visco-elastic properties of cellular tissues during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p.278–288, 2012.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer**. Unpublished MS Thesis, Purdue University, Lafayette, IN, 1949.

SEGUÍ, L.; FITO, P. J.; FITO, P. Understanding osmotic dehydration of tissue structured foods by means of a cellular approach. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p.240–247, 2012.

SEGUÍ, L.; FITO, P. J.; FITO, P. Analysis of structure-property relationships in isolated cells during OD treatments. Effect of initial

structure on the cell behaviour. **Journal of Food Engineering**, v. 99, p.417–423, 2010.

StatSoft Inc. Statistica® 7.0 **User's Guide**. Tulsa, OK, USA: StatSoft Inc. 2007.

TASIRIN, S. M. et al. Drying of Citrus sinensis Peels in an Inert Fluidized Bed: Kinetics, Microbiological Activity, Vitamin C, and Limonene. **Drying Technology**, v. 32, p.497–508, 2014.

TOĞRUL, İ. T.; İSPIR, A. Effect on effective diffusion coefficients and investigation of shrinkage during osmotic dehydration of apricot. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p.2611–2621, 2007.

VIANA, A. D.; CORRÊA, J. L. G.; JUSTUS, A. Optimisation of the pulsed vacuum

osmotic dehydration of cladodes of fodder palm. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 49, p.726-732, 2014.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v. 19, p.583–597, 2001.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v. 26, p.457–465, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro.