



## **MODELAGEM MATEMÁTICA DO ENCOLHIMENTO VOLUMÉTRICO DURANTE A SECAGEM CONVECTIVA DE FATIAS DE BANANA**

FERNANDA R. ABRAHÃO<sup>1\*</sup>, JEFFERSON L. G. CORRÊA<sup>1</sup>, ARLLEY de B. M. SOUSA<sup>2</sup>,  
RENATA N. da CUNHA<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos,  
Departamento de Ciência dos Alimentos.

<sup>2</sup>Centro Universitário de Patos de Minas, Faculdade de Engenharia Química.

\*e-mail: fernanda.abarahao@estudante.ufla.br

**RESUMO** – A secagem é uma das técnicas mais antigas para a extensão da vida útil de produtos agrícolas, afetando diretamente a sua qualidade. A aplicação de temperaturas elevadas pode ocasionar em alterações nas suas propriedades sensoriais e físico-químicas finais, como escurecimento e contração volumétrica. Apesar de mencionado em vários estudos, o encolhimento que ocorre durante a secagem convectiva não costuma ser tratado por modelos matemáticos. O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de encolhimento volumétrico de fatias de banana durante a secagem convectiva nas temperaturas de 60 e 70 °C. Diferentes pré-tratamentos foram aplicados nas amostras: imersão em água por 30 min (IM), banho ultrassônico por 30 min (US) e desidratação osmótica por 60 min (OD) utilizando isomaltulose como agente osmótico. Três modelos empíricos da literatura foram utilizados para descrever a redução do volume com relação ao teor de umidade. O modelo matemático quadrático demonstrou melhor ajuste aos dados experimentais, apresentando maiores valores de coeficiente de determinação ( $R^2 \leq 0,997$ ) e menores valores de E (%), SSE e RMSE para todos os tratamentos aplicados.

### **INTRODUÇÃO**

A banana é uma fruta de grande cultivo, especialmente em países de clima tropical. A fruta se caracteriza por ser um alimento nutritivo e com boa digestibilidade, dispondo de um alto teor de carboidratos, potássio e de vitaminas (A, B6 e C). Devido à sua composição e propriedades físico-químicas, a banana apresenta grande susceptibilidade a processos deteriorantes logo após a fruta ser colhida, diminuindo sua vida de prateleira. A produção de banana desidratada representa uma opção para preservar a sua qualidade e valor nutricional (MERCALI *et al.*, 2010; TIROUTCHELVAME; MARAN; PRAGALYAASHREE, 2019).

O processo de secagem é uma das técnicas de preservação de alimentos mais

antigas (GANESAPILLAI; REGUPATHI; MURUGESAN, 2011). A remoção da umidade do produto resulta em uma vida útil mais longa, visto que a atividade microbológica é minimizada, além de maior facilidade para transporte e armazenamento futuros. A técnica de secagem mais tradicional na indústria alimentícia é a utilização de ar quente ou secagem convectiva (OSTERMEIER *et al.*, 2018).

Porém, dentre as desvantagens do processo está a aplicação de temperaturas elevadas, o que pode resultar na degradação do alimento e alteração nas suas propriedades sensoriais e físico-químicas finais, como escurecimento e contração volumétrica. Após a secagem, especialmente em temperaturas mais elevadas, os alimentos podem apresentar encolhimento de suas dimensões em até 50% (CORRÊA *et al.*, 2012). Além disso, como o

processo demanda o consumo de grande quantidade de energia, resulta em um significativo impacto econômico e ambiental (ROJAS; AUGUSTO, 2018). Neste sentido, a aplicação de tratamentos previamente aos processos de secagem, representa uma alternativa para minimizar os danos resultantes e melhorar as características do produto final.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o encolhimento volumétrico durante a secagem convectiva de fatias de banana. Empregou-se três diferentes pré-tratamentos (banho ultrassônico, imersão em água e desidratação osmótica) e duas temperaturas de secagem (60 e 70 °C). Os dados experimentais de encolhimento volumétrico em função do teor de umidade foram ajustados por modelos encontrados na literatura.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Material

Bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum* L., Prata variety) foram obtidas do mercado local da cidade de Patos de Minas, MG, Brasil. A seleção das frutas foi realizada com base na sua integridade e no grau de maturação através da coloração da casca pela escala de Von Loesecke (1950). Foram selecionadas bananas nos estágios 3 e 4 (aspecto verde/amareladas). As frutas foram caracterizadas quanto ao seu teor de sólidos solúveis, com o uso de um refratômetro e teor de umidade em estufa a 105°C (AOAC, 2010). Foi obtido teor de umidade de  $2,63 \pm 0,14$  kg H<sub>2</sub>O / kg base seca e teor de sólidos solúveis equivalente a  $22,55 \pm 0,98$  °Brix.

As amostras foram higienizadas, descascadas manualmente e cortadas transversalmente em fatias com espessura de 0.5 cm e diâmetro de 2.5 cm com um cortador de inox específico.

### Pré-tratamentos

Para o processamento das fatias de banana e avaliação da sua influência na secagem convectiva, três diferentes pré-tratamentos foram aplicados: imersão em água destilada (IM), imersão em água em banho

ultrassônico (US) e desidratação osmótica (OD).

Para o pré-tratamento de imersão (IM), as amostras foram imersas em água deionizada, sob temperatura ambiente ( $22.0 \pm 2^\circ\text{C}$ ), sem agitação. O período de imersão das amostras foi de 30 minutos, sendo tal valor determinado em estudos preliminares. Após o período de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres e depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água.

No pré-tratamento ultrassônico (US), as amostras foram submetidas à energia ultrassônica em um banho ultrassônico (Modelo 03502, Quimis, São Paulo, Brasil) durante 30 min. As condições experimentais aplicadas foram potência de 70 W, frequência de 40 kHz e temperatura de execução de  $25.0 \pm 3,0$  °C. A potência volumétrica do ultrassom foi de  $7.907 \pm 0.658$  W/L determinada pelo método calorimétrico (LA FUENTE; TADINI, 2018). Após o tempo de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres e depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água.

Para o processo de desidratação osmótica (OD), as amostras foram imersas em soluções concentradas de isomaltulose ( $29,0 \pm 0.6$  °Brix) durante 60 min em temperatura ambiente ( $23,2$  °C) e sem agitação. Após o tempo de imersão, as amostras foram removidas do processo osmótico e depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de solução. Previamente ao processo osmótico, a solução de isomaltulose foi caracterizada quanto às suas propriedades físico-químicas. A densidade foi mensurada por meio de um picnômetro em temperatura ambiente e a viscosidade foi avaliada por meio de viscosímetro rotativo (Modelo Q860A21, Quimis, São Paulo, Brasil) utilizando um sensor cilíndrico concêntrico. Foram obtidos os seguintes valores: pH de  $7,55 \pm 0,11$ , densidade de  $1110$  kg/m<sup>3</sup> e viscosidade de  $3,1 \pm 0,4$  mPa.s.

### Secagem convectiva

A secagem convectiva das amostras foi executada em um secador de bandejas (Modelo PEG60, Pardal, Petrópolis, Brasil) com circulação de ar forçada com velocidade de  $1,1 \pm 0,3$  m/s, nas temperaturas de 60 e 70 °C. Após a realização dos pré-tratamentos, as amostras

foram dispostas em bandejas perfuradas. Para manter a condição de ar constante, apenas uma bandeja foi usada com uma única camada de amostra (aproximadamente 200 g) em cada secagem. As bandejas contendo as amostras foram pesadas em intervalos pré-determinados até o equilíbrio dinâmico (peso constante).

O teor de umidade das amostras durante o processo de secagem foi determinado gravimetricamente a partir do teor de umidade inicial da amostra (antes do processo de secagem). O peso da amostra foi medido em balança semi analítica (Modelo DG-15, Digimed, Brasil). Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata. Durante o processo de secagem, a umidade relativa do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas com o auxílio de um higrômetro digital, obtendo-se os valores de  $43,20 \pm 5,87 \%$  e  $41,45 \pm 3,67 \%$  respectivamente.

### Encolhimento volumétrico

O volume (V) das amostras foi calculado a partir da espessura e da média de três medidas do diâmetro das amostras nos respectivos eixos coordenados com o auxílio de um paquímetro digital calibrado (MTX – 510289, Matrix, Brasil). Três amostras foram avaliadas para cada tratamento durante a secagem. Para a determinação do volume, as amostras foram consideradas como um disco, conforme a Figura 1.

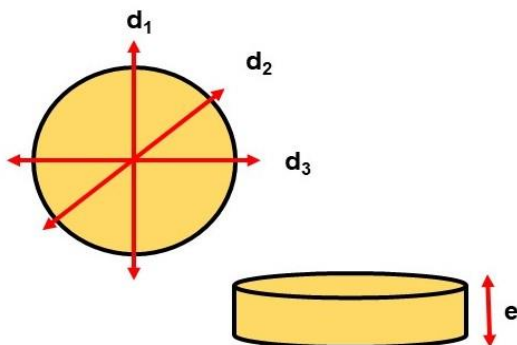


Figura 1: Medidas realizadas para cálculo do volume das fatias de banana.

Os modelos da literatura apresentados na Tabela 1 foram utilizados para ajustar a relação entre o encolhimento e o teor de umidade das amostras.

Tabela 1: Modelos matemáticos para ajuste de encolhimento volumétrico com relação ao teor de umidade (M).

Modelo	Equação
Linear	$\frac{V_t}{V_0} = a1 + a2 \left(\frac{M_t}{M_0}\right)$
Quadrático	$\frac{V_t}{V_0} = a1 + a2 \left(\frac{M_t}{M_0}\right) + a3 \left(\frac{M_t}{M_0}\right)^2$
Exponencial	$\frac{V_t}{V_0} = a1 \cdot \exp\left(k \cdot \frac{M_t}{M_0}\right)$

Fonte: (SENADEERA *et al.*, 2020).

### Análise estatística

Os parâmetros e constante das equações empíricas foram estimados, correlacionando-se os modelos matemáticos aos dados experimentais, com o uso da regressão não linear pelo método Quase-Newton ao nível de 5% de significância, pelo software Statistica 7.0® (StatSoft Inc., Tulsa, OK). A avaliação dos modelos aplicados foi baseada no maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e no menor valor do desvio médio relativo (E%) (Equação 1), em que  $m_i$  é o valor experimental,  $m_p$  é o valor previsto e N é o tamanho da amostra. Outros parâmetros estatísticos como a soma do erro quadrático (SSE) (Equação 2) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (Equação 3) também foram utilizados para avaliar e comparar a qualidade do ajuste.

$$E (\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad (1)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito dos diferentes pré-tratamentos aplicados e das temperaturas de secagem no encolhimento das fatias de banana foi avaliado e as alterações no volume ( $V_t/V_0$ ) em função do tempo estão apresentados na Figura 2. A redução do volume das fatias de banana foi proporcional com a redução do teor de umidade durante todos os processos de secagem

avaliados. Além disto, maiores encolhimentos foram observados para a temperatura de secagem mais alta (70 °C).

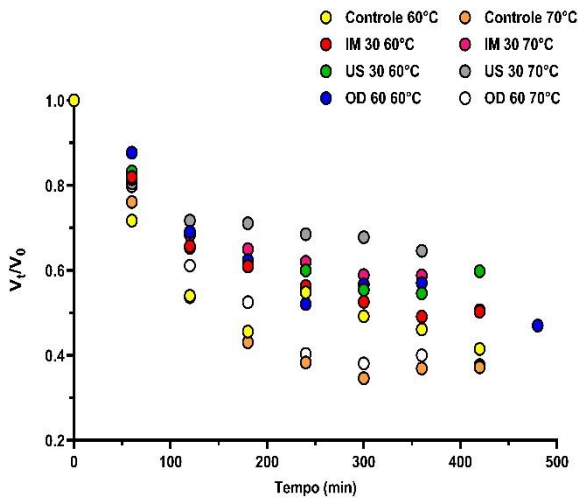


Figura 2: Evolução do encolhimento das amostras ao longo do tempo.

O encolhimento é uma alteração física inerente ao processo de secagem, representando um importante parâmetro de qualidade da fruta seca (MACEDO et al., 2022). A perda de água juntamente com o ar quente da secagem causa estresse ao tecido celular, alterando sua microestrutura e promovendo encolhimento (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017).

A remoção da água, durante a secagem, promove a redução do volume das fatias de banana, pelo fato da água ser um dos componentes majoritários na sua composição. O encolhimento da fruta aumenta com o volume de água removido, pois quanto maior o teor de umidade removido, mais tensões de contração são originadas na estrutura (AMAMI et al., 2017). Segundo Corrêa e colaboradores (2012), o encolhimento de fatias de banana durante a secagem convectiva tem uma relação linear com a razão de umidade. Ademais, é importante ressaltar, que o encolhimento pode ser influenciado por diversos fatores, como grau de maturação da fruta, variedade e condições de secagem (umidade do ar, velocidade do ar, temperatura, teor de umidade final).

Como resultado da redução do tempo total de secagem, as bananas secas tratadas previamente com energia ultrassônica (US) apresentaram maior integridade das paredes

celulares e menor retração, apresentando maiores valores de volume adimensional ( $V_t/V_0$ ) comparadas com as amostras tratadas com outros métodos. Com a aplicação da energia ultrassônica, a microestrutura celular fica mais porosa, a partir da formação dos microcanais, possibilitando um maior número de vias para a difusão de água, levando assim, a uma remoção de umidade mais rápida em direção à superfície. Também, é importante destacar que a rápida evaporação da água desencadeada pela secagem pode criar um grande fluxo de vapor na superfície, o que ajuda a prevenir o colapso do tecido celular e o encolhimento (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; ZHAO et al., 2019).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de ajuste dos modelos que relacionam o volume adimensional ( $V_t/V_0$ ) ao teor de umidade. A partir dos dados apresentados, observa-se que o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais de encolhimento volumétrico durante a secagem convectiva de fatias de banana foi o modelo quadrático. Para tal modelo foi observado maiores valores de  $R^2$  e menores valores de E (%), SSE e RMSE para todos os tratamentos aplicados. Os valores encontrados foram:  $R^2 \leq 0,997$ ;  $E (\%) \leq 5,503$ ;  $SSE \leq 0,034$  e  $RMSE \leq 0,184$ .

O modelo quadrático, por ser um modelo não linear, e apresentar mais parâmetros de ajuste, conseguiu prever as mudanças na retração das fatias de banana significativamente melhor que demais modelos estudados. Resultado semelhante foi observado para descrever a contração volumétrica durante a secagem de fatias de caqui (SENADEERA et al., 2020). Mayor & Sereno (2004) relataram que o modelo quadrático apresenta um bom ajuste aos dados experimentais de retração volumétrica em função da razão de umidade para maçãs, cenouras e fatias de batata durante a secagem convectiva.

Tabela 2: Relação entre volume adimensional ( $V_t/V_0$ ) e o teor de umidade ( $M_t/M_0$ ).

Modelo	Parâmetros	R <sup>2</sup>	E (%)	SSE	RMSE
<b>Controle, 60°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,189; a_2 = 0,758$	0,954	0,622	$3 \times 10^{-3}$	0,054
Quadrático	$a_1 = 0,496; a_2 = -0,396; a_3 = 0,904$	0,979	0,571	0,001	0,037
Exponencial	$a_1 = 0,303; k = 1,176$	0,972	0,030	$2 \times 10^{-3}$	0,042
<b>Controle, 70°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,051; a_2 = 0,958$	0,996	0,107	$4 \times 10^{-4}$	0,019
Quadrático	$a_1 = 0,042; a_2 = 0,996; a_3 = -0,029$	0,996	0,087	$4 \times 10^{-4}$	0,019
Exponencial	$a_1 = 0,239; k = 1,462$	0,985	1,441	$1 \times 10^{-3}$	0,038
<b>US 30 min, 60°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,575; a_2 = 0,363$	0,416	5,707	0,038	0,195
Quadrático	$a_1 = 0,950; a_2 = -1,213; a_3 = 1,294$	0,515	5,303	0,034	0,184
Exponencial	$a_1 = 0,589; k = 0,485$	0,430	5,527	0,037	0,193
<b>US 30 min, 70°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,534; a_2 = 0,439$	0,977	0,057	$6 \times 10^{-4}$	0,023
Quadrático	$a_1 = 0,653; a_2 = 0,044; a_3 = 0,389$	0,993	0,035	$1 \times 10^{-4}$	0,013
Exponencial	$a_1 = 0,565; k = 0,555$	0,986	0,011	$4 \times 10^{-4}$	0,018
<b>IM 30 min, 60°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,335; a_2 = 0,673$	0,996	0,097	$2 \times 10^{-4}$	0,015
Quadrático	$a_1 = 0,307; a_2 = 0,789; a_3 = -0,096$	0,996	0,062	$2 \times 10^{-4}$	0,014
Exponencial	$a_1 = 0,495; k = 0,704$	0,996	0,391	$6 \times 10^{-4}$	0,025
<b>IM 30 min, 70°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,444; a_2 = 0,547$	0,996	0,022	$2 \times 10^{-4}$	0,013
Quadrático	$a_1 = 0,482; a_2 = 0,388; a_3 = 0,128$	0,997	0,035	$1 \times 10^{-4}$	0,012
Exponencial	$a_1 = 0,795; k = 0,008$	0,999	0,055	$1 \times 10^{-4}$	0,012
<b>OD 60 min, 60°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,251; a_2 = 0,766$	0,979	0,334	0,001	0,034
Quadrático	$a_1 = 0,228; a_2 = 0,851; a_3 = -0,067$	0,980	0,317	0,001	0,034
Exponencial	$a_1 = 0,370; k = 1,028$	0,973	0,637	$2 \times 10^{-3}$	0,039
<b>OD 60 min, 70°C</b>					
Linear	$a_1 = 0,099; a_2 = 0,928$	0,993	0,473	$6 \times 10^{-4}$	0,024
Quadrático	$a_1 = -0,043; a_2 = 1,475; a_3 = -0,430$	0,997	0,120	$3 \times 10^{-4}$	0,016
Exponencial	$a_1 = 0,276; k = 1,332$	0,974	1,906	0,002	0,048

## CONCLUSÃO

O encolhimento volumétrico durante a secagem convectiva de fatias de banana pode ser relacionado à variação do teor de umidade durante o processo. Seu comportamento apresenta boa predição com o modelo matemático quadrático.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro e ao Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) por ter cedido o laboratório para os estudos.

## NOMENCLATURA

$a_1$	Parâmetro dos modelos matemáticos
$a_2$	Parâmetro dos modelos matemáticos
$a_3$	Parâmetro dos modelos matemáticos
$k$	Constante do modelo matemático
$m_i$	Valores obtidos experimentalmente
$m_p$	Valores preditos pelos modelos
$M_t$	Teor de umidade [kg de H <sub>2</sub> O / kg]
$M_0$	Teor de umidade inicial [kg de H <sub>2</sub> O / kg]
$N$	Número de observações
$V_t$	Volume da amostra no tempo $t$ [mm <sup>3</sup> ]
$V_0$	Volume inicial da amostra [mm <sup>3</sup> ]

## REFERÊNCIAS

- AMAMI, E. *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 36, p. 286–300, 2017.
- AOAC – Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis (18th ed.). Arlington: Association of Official Analytical, 2010.
- CORRÊA, J.L.G. *et al.* The Influence of Ethanol on the Convective Drying of Unripe, Ripe, and Overripe Bananas. *Drying Technology*, v. 30, p. 817–826, 2012.
- FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. *Drying Technology*, v. 26, p. 1509–1516, 2008.
- GANESAPILLAI, M.; REGUPATHI, I.; MURUGESAN, T. Modeling of Thin Layer Drying of Banana (*Nendran Spp*) under Microwave, Convective and Combined Microwave-Convective Processes. *Chemical Product and Process Modeling*, v. 6, n. 1, 2011.
- JUNQUEIRA, J. R. de J.; CORRÊA, J. L. G.; ERNESTO, D. B. Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 41, n. 6, p. 1–8, 2017.
- LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. *Journal of Food Science and Technology*, v. 55, n. 12, p. 5098–5105, 2018.
- MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. *LWT - Food Science and Technology*, v. 155, p. 112918, 2022.
- 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.
- MERCALI, G. D. *et al.* Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum, shum.*). *International Journal of Food Science and Technology*, v. 45, p. 2281–2289, 2010.
- OSTERMEIER, R *et al.* Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*, v. 237, p. 110–117, 2018.
- ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration : Kinetics , mechanisms and impact on viscoelastic properties. *Journal of Food Engineering*, v. 233, p. 17–27, 2018.
- SENADEERA, WIJITHA *et al.* Influence of different hot air drying temperatures on drying kinetics, shrinkage, and colour of persimmon slices. *Foods*, v. 9, n. 1, p. 5–7, 2020.

- TIROUTCHELVAME, D.; MARAN, J. P.; PRAGALYAASHREE, M. M. Response surface analysis and optimization of osmotic dehydration of *Musa acuminata* slices. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, n. 1, p. 1016–1021, 2019.
- VON LOESECKE, H.W. *Bananas: Chemistry, Physiology*. New York: Technology Inter Science, 1950.
- ZHAO, Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. *Drying Technology*, v. 37, n. 3, p. 352–362, 2019.