

Cinética de secagem de maçãs Fuji (*Malus domestica*)

Elciane Regina Zanatta^{1*}; Vitória Mayumi Dos Santos Souza^{1, 2}; Fernanda Carolina Pompeu Menegoli¹; Carolina Castilho Garcia¹

¹ Departamento de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus de Medianeira, Paraná.

² Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal.

* elcianezanatta@utfpr.edu.br

Resumo: A maçã (*Malus domestica*) é uma das frutas mais comumente consumidas e comercializadas no mundo inteiro, sendo uma fruta de reconhecimento por sua composição nutricional. Considerando as altas perdas na colheita e pós-colheita e a facilidade operacional, a secagem de pedaços de frutos considerados impróprios para comercialização apresenta-se como uma alternativa viável. O trabalho teve como objetivo o estudo da cinética de secagem de pedaços de maçãs Fuji usando diferentes modelos matemáticos: Page, Logaritmo, Henderson e Pabis, Midilli e Newton. A segunda lei de Fick foi utilizada para determinar a difusividade efetiva da água durante a operação de secagem. As maçãs foram fatiadas com espessuras de 0,5 e 1,5 cm. A secagem foi realizada com circulação natural de ar às temperaturas controladas de 60 e 70 °C durante um período de 4 h. Maiores taxas de secagem foram observadas para as fatias de menor espessura secas à maior temperatura de operação. O modelo de Midilli representou de forma satisfatória o processo de secagem em todas as condições estudadas. A difusividade efetiva da água no interior das amostras foi da ordem de $10^{-4} - 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ e tanto maior quanto maior a espessura e a temperatura de secagem.

Palavras-chave: Modelagem matemática; Segunda lei de Fick; Coeficiente de difusão.

Drying kinetics of Fuji apples (*Malus domestica*)

Abstract: Apple (*Malus domestica*) is one of the most commonly consumed and marketed fruits worldwide, being a recognized fruit for its nutritional composition. Considering the high losses at harvest and post-harvest and the ease of operation, drying pieces of fruit considered unsuitable for commercialization presents itself as a viable alternative. This work aimed to study the drying kinetics of pieces of Fuji apples using different mathematical models: Page, Logarithm, Henderson and Pabis, Midilli, and Newton. Fick's second law was used to determine the effective diffusivity of water during the drying operation. The apples were sliced with thicknesses of 0.5 and 1.5 cm. Drying was carried out with natural air circulation at controlled temperatures of 60 and 70 °C for a period of 4 h. Higher drying rates were observed for thinner slices dried at the higher operating temperature. The Midilli model satisfactorily represented the drying process in all studied conditions. The effective diffusivity of the water inside the samples was of the order of $10^{-4} - 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ and as greater as the thickness and the drying temperature.

Keywords: Mathematical modeling; Fick's second law; Diffusion coefficient.

Introdução

A maçã (*Malus domestica*) é uma das frutas mais consumidas e comercializadas no mundo inteiro, pois este é um fruto que possui ampla disponibilidade durante todo o ano, sendo fonte de açúcares, vitaminas, minerais, e de diversos metabólitos secundários biologicamente ativos (PEREIRA, 2014).

Um problema enfrentado pelos fruticultores é a conservação dos frutos maduros, já que a fruta é abundante em água, tornando-a propícia ao desenvolvimento de microrganismos e à ocorrência de reações químicas e bioquímicas. Devido a esse e outros fatores, como, por exemplo, injúrias mecânicas durante o transporte, grande parte da colheita é desperdiçada. Estima-se que mais de 40 % das perdas de alimentos nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, ocorrem nas etapas de pós-colheita e processamento (GUSTAVSSON *et al.*, 2011). Portanto, são necessários métodos que, além de reduzirem o teor de água livre, possibilitem aproveitar partes de alimentos que seriam descartados por serem considerados inapropriados para comercialização.

A secagem é operacionalmente simples, sendo de fácil aplicação por fruticultores, por exemplo, e apresenta grande benefício econômico na comercialização de frutas processadas (GOMES, 2007). A desidratação ou secagem é uma operação importante para as indústrias químicas e alimentícias, sendo seu principal objetivo a remoção parcial ou total da água de determinados produtos, a fim de inibir o desenvolvimento de determinados microrganismos (VAGENAS *et al.*, 1990). É um processo que torna um material sólido, semissólido ou líquido em um produto de umidade baixa, aumentando sua conservação.

Há um grande interesse da indústria alimentícia no processo de secagem, pois com a redução da atividade de água, estende-se a vida de prateleira do produto para meses ou até mesmo anos, tendo um menor custo de armazenamento, visto que podem ser armazenados a temperatura ambiente, implicando em menor custo de transporte e resultando em produto de maior valor agregado e seguro ao consumidor (TADINI, 2016).

Foram utilizados 3 parâmetros para analisar a secagem, sendo eles: velocidade, temperatura e umidade relativa do ar, possibilitando estudar a cinética de secagem, que é a velocidade em que a umidade é removida do alimento. O conhecimento da movimentação das moléculas de água dentro do produto é de vital importância para o correto estudo das interações entre a água e os componentes dos produtos agrícolas. A umidade pode se movimentar no interior dos produtos agrícolas durante o processo de secagem por diferentes formas, dentre elas

a difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, o fluxo hidrodinâmico, a difusão de vapor e a difusão térmica (MARTINAZZO *et al.*, 2007).

A teoria da difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, é utilizada frequentemente para calcular o coeficiente de difusão efetivo da água no interior do material (GONELI *et al.*, 2007). Para a determinação do coeficiente de difusão efetivo são empregadas as curvas de secagem obtidas em condições controladas de produtos agrícolas (GELY & SANTALLA, 2007). Em relação à secagem de alimentos são observadas grandes variações nos valores do coeficiente de difusão efetivo, devido à complexidade dos produtos, dos diferentes métodos de predição, do tipo de material, do teor de água, do processo de secagem e da metodologia utilizada para sua obtenção (GONELI *et al.*, 2007).

Métodos convencionais como o de secagem em estufa, com ou sem circulação de ar são muito empregados. Essas técnicas são relativamente baratas se comparadas a outras como a liofilização, que apesar de resultar em produtos com melhores características sensoriais e nutricionais, apresenta alto custo de implantação e operação. A secagem em estufas é um método viável de operação e apresenta bom rendimento, podendo ainda ser utilizada recirculação de ar para economia energética. A cinética de secagem de diversos produtos agrícolas, como frutos, grãos, sementes e de algumas espécies de plantas com importância econômica foi estudada por diversos pesquisadores, sendo observado que dependendo do produto e das condições da operação, diferentes modelos matemáticos representam cada situação (MARTINAZZO *et al.*, 2007).

A obtenção e modelagem das curvas de secagem de um determinado produto possibilita determinar índices físicos e termodinâmicos relacionados às transferências de calor e massa, que são fundamentais para o dimensionamento adequado de toda a estrutura utilizada para a secagem. Além disso, por meio da avaliação desses índices, é possível comparar e avaliar as peculiaridades dos alimentos. Assim, considerando-se a importância do estudo teórico da operação de secagem, objetivou-se neste trabalho ajustar os dados experimentais da secagem de maçã Fuji (*Malus domestica*) a diferentes modelos matemáticos para selecionar o que melhor represente o fenômeno, assim como obter o coeficiente de difusão efetivo da água no interior do sólido durante a operação.

Material e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Medianeira, Paraná, Brasil. Foram utilizadas maçãs da variedade Fuji (*Malus*

domestica), adquiridas em comércio local na cidade de Medianeira-PR. As amostras foram higienizadas e fatiadas em espessuras de 0,5 e 1,5 cm, com o auxílio de um cortador de frios (*Fun Kitchen*). Essas fatias foram cortadas em pedaços retangulares com um cortador metálico (2,76 x 1,77 cm) e, foram distribuídas em bandejas metálicas retangulares perfuradas, previamente pesadas.

A secagem das amostras foi realizada em uma estufa de secagem com controlador digital de temperatura e convecção natural do ar de secagem (Quimis, Diadema – SP) às temperaturas controladas de 60 e 70 °C durante um período de 4 horas. Os ensaios de equilíbrio higroscópico foram conduzidos de forma dinâmica com maçãs de 0,5 cm e 1,5 cm de espessura às temperaturas de 60 e 70 °C por um período de 22 horas. Para a análise de umidade, utilizou-se o método gravimétrico da AOAC (2016), sendo as determinações realizadas em triplicata para as amostras frescas, secas pelo tempo estabelecido de secagem e para as amostras de equilíbrio. Os dados experimentais de secagem foram ajustados a modelos matemáticos empíricos/semi-empíricos frequentemente utilizados para descrever a secagem de diferentes produtos agrícolas, os quais são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos matemáticos utilizados para estimar a razão de umidade (*RU*) em função do tempo de secagem dos pedaços de maçãs da variedade Fuji (*Malus domestica* Borkh).

	Modelo	Equação
Page (OVERHULTS <i>et al.</i> , 1973)	$RU = \exp(-k * t^b)$	1
Logarítmo (SANTOS <i>et al.</i> , 2019 ^a)	$RU = a * \exp(-k * t) + b$	2
Henderson e Pabis (SANTOS <i>et al.</i> , 2019 ^a)	$RU = a * \exp(-k * t)$	3
Midilli (SIQUIERA <i>et al.</i> , 2013)	$RU = a * \exp(-k * t^n) + b * t$	4
Newton (REIS <i>et al.</i> , 2017)	$RU = \exp(-k * t)$	5

Em que: *RU* é a razão de umidade (adimensional); *t* é o tempo de secagem (s); *k* é a constante de secagem (s⁻¹); *a*, *b* e *n* são coeficientes dos modelos.

A razão de umidade (*RU*) do produto durante a secagem foi determinada pela Equação 6.

Equação 6 – Cálculo da razão de umidade adimensional.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_o - U_e}$$

Em que:

RU: razão de umidade, adimensional;

U_t: teor de água do produto em um instante de tempo, em base seca;

U_e: teor de água do produto em equilíbrio com o ar de secagem, em base seca;

U_o : teor de água inicial do produto, em base seca.

Os coeficientes dos modelos foram determinados por meio de análise de regressão não-linear utilizando-se o *software Excel®* que fornece uma opção para essa tarefa, o suplemento Solver, o qual utiliza o método GRG2 – Gradiente Reduzido Generalizado (LASDON *et al.*, 1978). Os parâmetros foram ajustados comparando-se graficamente os valores estimados e observados até a obtenção de um resultado próximo à solução desejada, que era a representatividade dos dados experimentais. O GRG2 foi executado mais de uma vez, utilizando-se do resultado anterior com o objetivo de melhorar a solução encontrada, bem como o resultado já obtido nos parâmetros dos demais modelos.

Os coeficientes de difusão efetivos da água foram determinados de acordo com a lei de Fick em uma forma modificada a partir das soluções integradas de Crank (1975), considerando as amostras como placa plana, segundo a Equação 7.

Equação 7 – Cálculo do Coeficiente de Difusão da Água

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_o - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-(2n-1)^2 \frac{D_{ef} \pi^2 t}{z^2} \right]$$

Em que:

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo (m^2/s);

z : dimensão característica (meia espessura para placas planas), em m;

t : tempo, em s;

n : número de termos da série.

Para verificar o ajuste, avaliou-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e do erro padrão de estimativa (SE), este último calculado pela Equação 8.

Equação 8 – Cálculo do Erro Padrão de Estimativa.

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y_e - Y_m)^2}{GLR}}$$

Em que:

Y_e : valor observado experimentalmente;

Y_m : valor calculado pelo modelo;

GLR: graus de liberdade do resíduo (números de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

Resultados e Discussão

Durante a secagem das maçãs houve mudanças visuais na cor, tamanho e textura das frutas como resultado de alterações físicas, químicas e bioquímicas. De acordo com Duarte *et al.* (2012), a alteração na cor das amostras é relacionada ao escurecimento enzimático que ocorre através da ação da peroxidase e outras enzimas oxidativas, sendo muito comum em frutas que passam pelo processo de secagem. Em relação a tamanho e textura, Silva *et al.* (2013) e Garcia *et al.* (2014) relatam que durante a secagem ocorre encolhimento das amostras devido a alterações na estrutura do produto como resultado da perda de água.

Na Tabela 2 são apresentadas as umidades médias inicial, finais, após 4 h de secagem, e de equilíbrio para as frutas de espessuras 0,5 e 1,5 cm secas a 60 e 70 °C.

Tabela 2 – Umidades médias inicial, finais, após 4 h de secagem, e de equilíbrio das maçãs de espessuras 0,5 e 1,5 cm secas a 60 e 70 °C.

	Espessura 0,5 cm	Espessura 1,5 cm
Secagem a 60 °C		
Umidade inicial, %	83,88 ± 0,2	83,88 ± 0,2
Umidade final, %	22,76 ± 2,0	54,61 ± 3,6
Umidade de equilíbrio, %	7,87 ± 0,7	7,62 ± 1,5
Secagem a 70 °C		
Umidade inicial, %	81,88 ± 1,3	81,88 ± 1,3
Umidade final, %	5,46 ± 0,3	38,60 ± 2,9
Umidade de equilíbrio, %	2,01 ± 0,1	7,59 ± 0,7

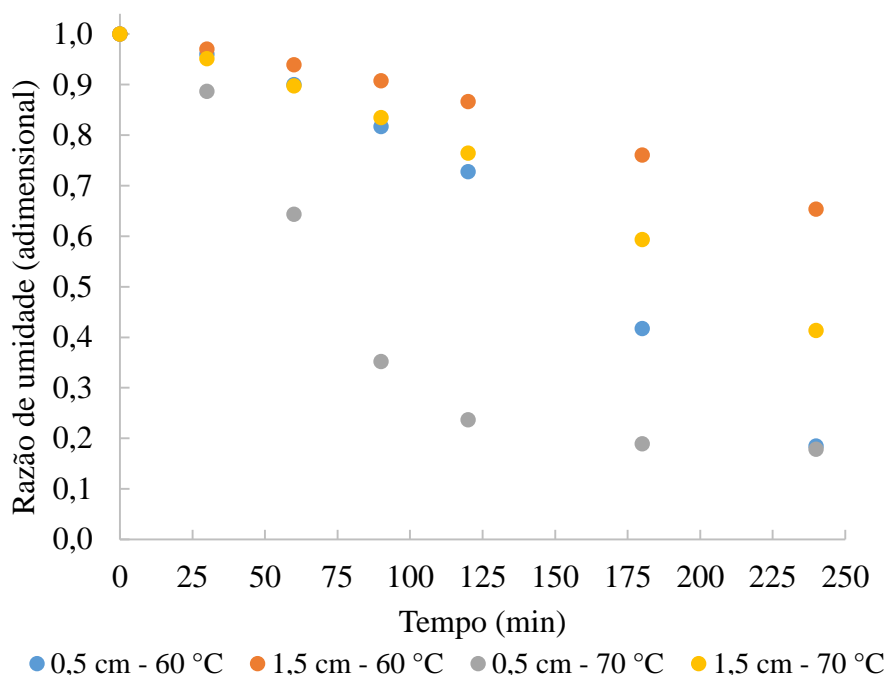
Resultados expressos como média ± desvio padrão, em base úmida (%).

Na Tabela 1, comparando os resultados obtidos para cada temperatura utilizada no processo de secagem, observou-se que as amostras de menor espessura apresentaram menor umidade em relação às mais espessas. Isso se deve ao fato de que o caminho percorrido pela água do interior da maçã até a sua superfície ser menor nas amostras de 0,5 cm, acelerando a operação.

Para mais, comparando as umidades da Tabela 1 para cada espessura, observou-se que a maior temperatura de secagem resultou em umidades finais menores em relação aos valores para a temperatura de 60 °C para o mesmo tempo de operação. De acordo com Melo *et al.* (2015) “esse comportamento deve-se ao fato das maiores taxas de remoção de água do produto ocorrerem nas maiores temperaturas”, já que são maiores as taxas de transferência de calor.

Os dados experimentais de secagem das maçãs nas espessuras de 0,5 cm e 1,5 cm, secas a 60 e 70 °C são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Dados experimentais da razão de umidade (adimensional) em função do tempo (min) para a secagem de maçãs com espessuras de 0,5 cm e 1,5 cm a 60 e 70 °C.
Fonte: Autoria Própria (2023)



Pela Figura 1, observou-se que a secagem das fatias de 0,5 cm de espessura na temperatura de 70 °C resultou em menor umidade final durante a operação. Isso está relacionado à pressão de vapor das moléculas de água, que aumenta em função da temperatura, favorecendo a transferência da água para o ar de secagem (OLIVEIRA et al., 2015).

É possível verificar na Figura 1 operações mais rápidas à medida que a temperatura aumenta e a espessura diminui. Isso ocorre porque nas secagens realizadas em temperaturas mais altas e espessuras menores, mais calor é transferido do meio aquecido para o material e, então, o deslocamento da água do interior do material para a sua superfície é maior (CASTRO et al., 2016; REIS et al., 2013).

Como apontado anteriormente, o aumento da temperatura do ar de secagem leva a maiores taxas de transferência de calor, o que acarreta em diminuição do tempo de secagem, o que pode ser claramente observado na Figura 1.

Verificou-se a partir das curvas apresentadas na Figura 1 que não detectado o período de taxa constante de secagem, apontando que as desidratações ocorreram no período de taxa de secagem decrescente. Nesse período ocorre maior resistência à transferência de massa do interior do produto para sua superfície e, portanto, a difusão é o principal mecanismo que governa o movimento de água (GARCIA *et al.*, 2014; KASHANINEJAD *et al.*, 2007). A ausência do período de secagem em taxa constante está relacionada à estrutura da amostra e suas interações com a água, de forma que não houve uma fonte constante de água na superfície das amostras durante a secagem (SANTOS *et al.*, 2013). Este comportamento está em acordo com os resultados apresentados para outros frutos, a exemplo de, lichia (REIS *et al.*, 2017), araticum (BOTREL *et al.*, 2016), fruta do espinheiro (ARAL; BEŞE, 2016), mamão (UDOMKUN *et al.*, 2015; GARCIA *et al.*, 2014), abacaxi (OLANIPEKUN *et al.*, 2015) e figo (XANTHOPOULOS *et al.*, 2009). Esse tipo de curva evidencia um comportamento típico de materiais com estruturas celulares, como frutas e hortaliças em fatias (BI *et al.*, 2015).

Almeida *et al.* (2020) avaliaram a influência da espessura na cinética de secagem de fatias de beterraba utilizando 4, 6 e 8 cm de espessura. Os autores constataram que o aumento da espessura do produto influenciou as variações de umidade em seu interior no decorrer do tempo, que foram tanto menores quanto maior a espessura. Esse fato pode ser evidenciado na Figura 1.

Melo *et al.* (2015) avaliaram a influência da temperatura na secagem de pimenta de cheiro, trabalhando a 50, 60 e 70 °C. Os autores verificaram maior taxa de secagem a 70 °C e menor taxa para a menor temperatura, como no presente trabalho (Figura 1).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados para os parâmetros dos modelos matemáticos empíricos/semi empíricos aos quais foram ajustados os dados experimentais de secagem. Também são apresentados os coeficientes de determinação (R^2) para cada ajuste, assim como o erro padrão das estimativas (SE).

De acordo com Madamba *et al.* (1996), o coeficiente de determinação (R^2), não constitui sozinho um bom critério para a seleção de modelos não lineares; para isto, os valores do erro padrão de estimativa (SE) também foram considerados. De acordo com Draper & Smith (1998), quanto menor o erro padrão da estimativa (SE) maior será a confiabilidade e a precisão da estimativa.

Observou-se que todos os modelos matemáticos aos quais os dados experimentais de secagem da maçã nas diferentes espessuras foram ajustados, apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90, indicando, de acordo com Mohapatra & Rao (2005), uma

representação satisfatória da operação. Verificou-se que o maior valor do erro padrão das estimativas foi de 0,0883, para o ajuste pelo modelo de Newton, que apontam boa aproximação do valor calculado pelos modelos aos dados experimentais, uma vez que valores de erros menores que 10 % significam ajuste satisfatório dos modelos para representação de secagem (MADAMBA *et al.*, 1996; MOHAPATRA; RAO, 2005).

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos matemáticos aos quais foram ajustados os dados experimentais da secagem de maçãs nas espessuras de 0,5 e 1,5 cm a 60 e 70 °C, coeficientes de determinação (R^2) e erros padrão das estimativas (SE).

	Modelo	k	a	b	n	SE	R^2
0,5 cm, 60 °C	Page	$9,7 \cdot 10^{-6}$	-	2,1972	-	0,0021	0,9968
	Logaritmo	0,0040	1,0000	0,0000	-	0,0883	0,9001
	Henderson e Pabis	0,0040	1,0000	-	-	0,0883	0,9001
	Midilli	$4,9 \cdot 10^{-6}$	1,0000	0,0000	2,3229	0,0031	0,9975
	Newton	0,0040	-	-	-	0,0883	0,9001
1,5 cm, 60 °C	Page	$2,8 \cdot 10^{-6}$	-	2,1972	-	0,0061	0,9786
	Logaritmo	0,0015	1,0000	0,0000	-	0,0049	0,9665
	Henderson e Pabis	0,0015	1,0000	-	-	0,0049	0,9665
	Midilli	0,0001	1,0000	0,0000	1,4647	0,0002	0,9978
	Newton	0,0015	-	-	-	0,0049	0,9665
0,5 cm, 70 °C	Page	0,0034	-	1,2175	-	0,0355	0,9531
	Logaritmo	0,0097	0,9728	0,0271	-	0,0415	0,9472
	Henderson e Pabis	0,0092	1,0000	-	-	0,0418	0,9454
	Midilli	0,0002	1,0000	0,0008	1,9139	0,0023	0,9967
	Newton	0,0092	-	-	-	0,0418	0,9454
1,5 cm, 70 °C	Page	$5,2 \cdot 10^{-6}$	-	2,2180	-	0,0120	0,9860
	Logaritmo	0,0028	1,0000	0,0000	-	0,0190	0,9550
	Henderson e Pabis	0,0028	1,0000	-	-	0,0190	0,9550
	Midilli	0,0001	1,0000	0,0000	1,5898	0,0009	0,9971
	Newton	0,0028	-	-	-	0,0190	0,9550

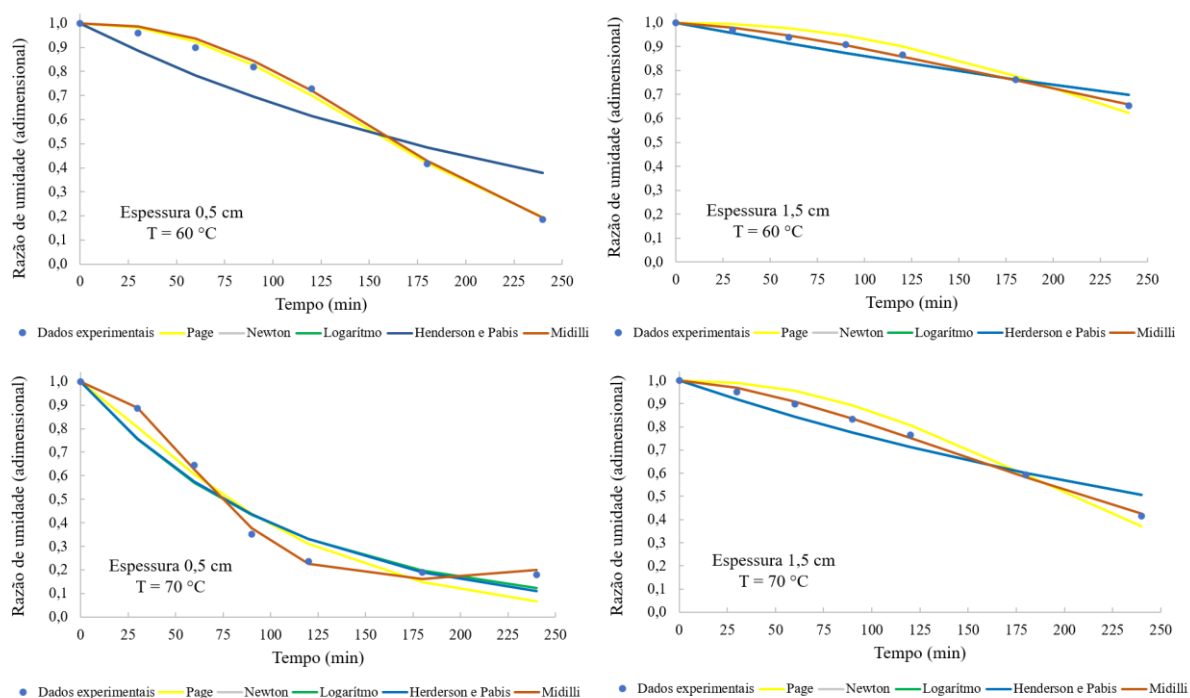
Em que: k é a constante de secagem (s^{-1}); a , b e n são coeficientes dos modelos; R^2 é o coeficiente de determinação; SE é o erro padrão das estimativas.

A partir dos valores de R^2 e SE apresentados na Tabela 3, verificou-se que o modelo de Midilli foi o mais adequado para descrever os experimentos de secagem em ambas espessuras

e temperaturas, por apresentar coeficiente de determinação com valores superiores a 0,99 e valores de erro médio estimado (*SE*) menor que 0,0031, em todas as condições.

Na Figura 2 estão representadas as curvas da razão de umidade em função do tempo para os dados experimentais (representados por pontos azuis) e estimados por modelos matemáticos (representados por linhas em cores diferentes de acordo com a legenda) da secagem a 60 e 70 °C de maçã Fuji com 0,5 e 1,5 cm de espessura.

Figura 2 – Razão de umidade em função do tempo para os dados experimentais e estimados por modelos matemáticos da secagem a 60 e 70 °C de maçã Fuji nas espessuras de 0,5 e 1,5 cm. Fonte: Autoria Própria (2023).



É possível confirmar pela Figura 2 que todos os modelos matemáticos representam os dados experimentais de secagem, sendo o modelo de Midilli o que apresentou melhor ajuste. Melo *et al.* (2015) realizaram o estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas, e concluíram que o modelo de Midilli *et al.* foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ao comparar com os outros modelos estudados.

Os modelos matemáticos apresentados descrevem as operações nas condições em que os dados experimentais foram obtidos, baseando-se na velocidade e na umidade relativa do ar de secagem e em sua temperatura, que são variáveis externas ao produto (FERREIRA *et al.*, 2014). Com esses modelos, pode-se dimensionar, otimizar e determinar a viabilidade da aplicação comercial do processamento.

Em virtude do mecanismo de transporte da água no interior do produto durante a secagem ocorrer por meio da difusão, utilizou-se a Equação 7, baseada na segunda lei de Fick para produtos com forma geométrica de placa plana, para calcular o coeficiente de difusão efetivo da água no interior do alimento. A linearização da Equação 7 é mostrada na Equação 9.

Equação 9 – Linearização da Equação 7 que representa a segunda lei de Fick para placas planas.

$$\ln\left(\frac{RU \cdot \pi^2}{8}\right) = -\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{D_{ef}}{z^2} \cdot t$$

Em que:

RU : razão de umidade (adimensional);

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo (m^2/s);

z : dimensão característica (meia espessura para placas planas), em m;

t : tempo, em s.

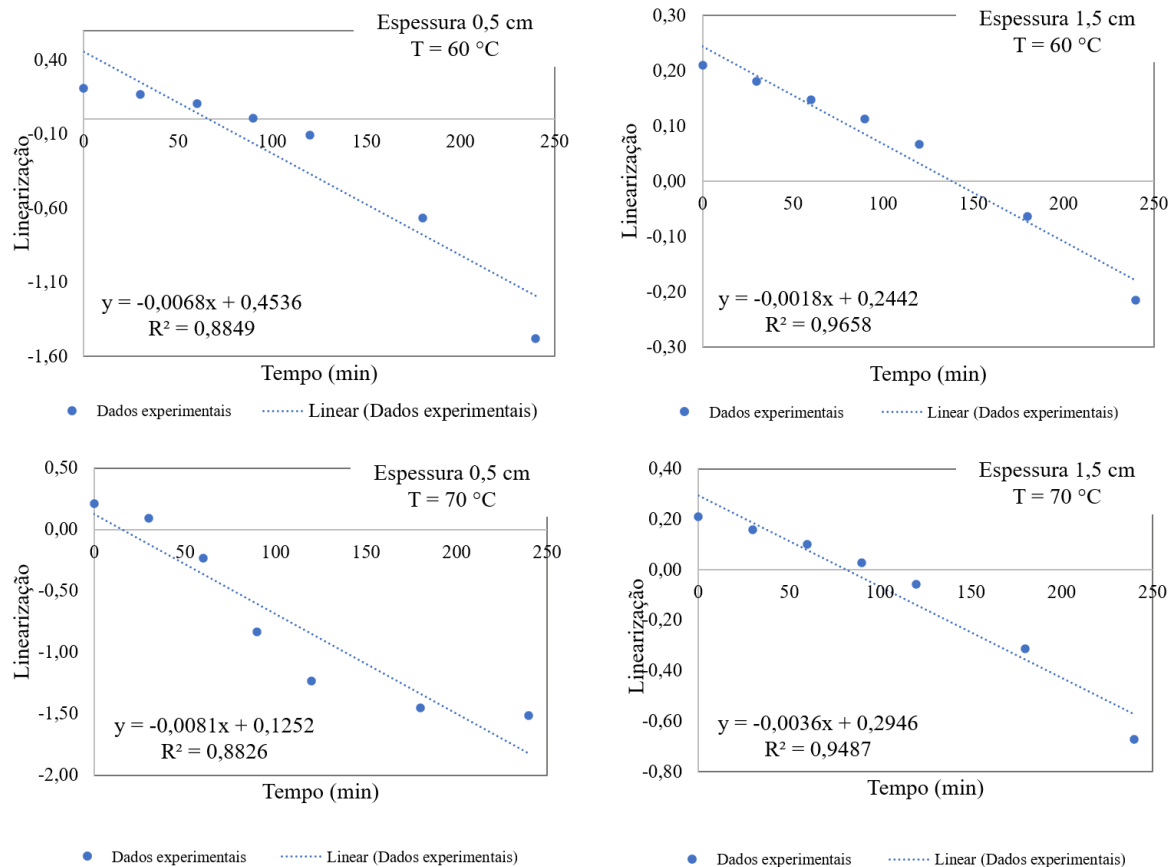
Desta forma, construiu-se o gráfico \ln vs. t para as frutas em ambas espessuras nas duas temperaturas de secagem, 60 e 70 °C, os quais estão representados na Figura 3. A partir do coeficiente angular da reta é calculada a difusividade efetiva da água no interior do produto (D_{ef}) utilizando a Equação 10.

Equação 10 – Cálculo do coeficiente de difusão efetiva da água no interior do produto.

$$y \text{ (coeficiente angular da reta)} = -\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{D_{ef}}{z^2} \cdot t$$

Os coeficientes de difusão efetiva da água no interior dos pedaços de 0,5 e 1,5 cm de espessura secas à temperatura de 60 °C foram de $4,31 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ e $1,03 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$, respectivamente. À temperatura de 70 °C, esses valores foram de $5,13 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ para os pedaços de 0,5 cm e de $2,05 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ para pedaços de 1,5 cm. É possível verificar maiores coeficientes de difusão efetiva da água com o aumento da espessura da amostra e da temperatura do ar de secagem.

Figura 3 – Linearização da segunda lei de Fick para a secagem a 60 e 70 °C dos pedaços com 0,5 e 1,5 cm de espessura de maçãs Fuji, considerados como placas planas. **Fonte:** Autoria Própria (2023)



Segundo Sousa *et al.* (2017) existe uma tendência de aumento da difusividade efetiva da água com o incremento da espessura, influenciando diretamente na remoção de água do produto, sendo que quanto maior a espessura, menor é a variação dos gradientes de umidade em seu interior, aumentando o tempo de operação para atingir determinada umidade final. Isso também foi observado no presente trabalho.

No trabalho de Santos *et al.* (2019b) o D_{ef} de pedaços de 0,3 cm de maçãs Argentina e verde foi de $6,82 \cdot 10^{-4}$ e $6,71 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$, respectivamente, quando a secagem foi realizada a 60 °C em secador convectivo com ar à velocidade de 2 m s^{-1} . Sharabiani *et al.* (2021) estudaram a secagem convectiva de maçãs de 0,4 cm de espessura a 50, 60 e 70 °C em um secador convectivo com velocidade do ar de $1,2 \text{ m s}^{-1}$. Os autores verificaram aumento do valor do coeficiente de difusão efetivo da água com o aumento da temperatura do ar de secagem. A 70 °C, a difusividade da água foi de $2,45 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$.

A diferença nos valores de D_{ef} encontrados no presente trabalho em comparação aos verificados por Sharabiani *et al.* (2021) e Santos *et al.* (2019^b) são resultado de diferenças na umidade relativa e velocidade de circulação do ar na estufa de secagem, das espessuras das amostras e também estão relacionadas às distintas espécies de maçãs utilizadas nos experimentos.

Conclusões

Os dados apontaram que a espessura das fatias da fruta, assim como a temperatura de secagem influenciaram a operação, sendo verificados menores valores de umidade para as amostras menos espessas secas à maior temperatura, 0,5 cm e 70 °C.

Todos os modelos matemáticos analisados apresentaram ajuste satisfatório aos dados experimentais obtidos, porém dentre eles o modelo de Midilli foi o que resultou em melhor ajuste para a secagem dos pedaços de maçã, independente da espessura e da temperatura de secagem.

As curvas de secagem apresentaram comportamento característico, evidenciando que a secagem dos pedaços de fruta foi governada pela difusão da água no interior do sólido.

A difusividade efetiva da água no interior das frutas variou de $4,31 \cdot 10^{-5}$ a $2,05 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$, sendo maiores com o aumento da espessura da amostra e da temperatura do ar de secagem.

Referências

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; SILVA, V. M. de A.; RIBEIRO, V. H. de A.; BARROS, E. R.; CAVALCANTE, J. de A.; QUEIROGA, A. P. R. de; LUÍZ, M. R.; NASCIMENTO, A. R. B. do; NUNES, J. S. Influência da espessura na cinética de secagem de fatias de beterraba. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, p. 1894-2940, 2020.

AOAC- **Official Methods of Analysis of AOAC International**, 20th ed.; AOAC International: Rockville, MD, USA, 2016.

ARAL, S.; BEŞE, A. V. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. **Food Chemistry**, v. 210, p. 577-584, 2016.

BOTREL, D. A.; RODRIGUES, I. C. B.; SOUZA, H. J. B.; FERNANDES, R. V. B. Application of inulin in thin-layer drying process of araticum (*Annona crassiflora*) pulp. **Food Science and Technology**, v. 69, p. 32-39, 2016.

CASTRO, D.; MELO SILVA, L.; MOREIRA, I.; SOUSA, F.; SILVA, W.; ALMEIDA, F. Análise e descrição matemática da secagem de polpa de taturubá (*Pouteriamacrophyllas (lam.) eyma*) em camada fina. **Engvista**, v. 18, n. 2, p. 309-317, 2016.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, John Wiley & Sons, 1998. 712 p.

DUARTE, M. E. M.; UGULINO, S. M. P.; MATA, M. E. R. M. C.; GOUVEIA, D. S.; QUEIROZ, A. J. M. Desidratação osmótica de fatias de jaca. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 478-483, 2012.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd Edition, Oxford University Press, London, p. 69-88, 1975.

FERREIRA, A. P. R.; COSTA, J. de P. da; SOUSA, S. L.; RIBEIRO, L. C.; COSTA, J. M. C.; Comportamento higroscópico de polpa de seriguela atomizada utilizando diferentes agentes carreadores de secagem. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014, Florianópolis. **Anais online...** Florianópolis: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2014. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/comportamento-higroscopico-de-polpa-de-seriguela-atomizada-utilizando-diferentes-agentes-carreadores-de-secagem-17110>> Acesso em: 05 abr. 2023.

GARCIA, C. C.; CAETANO, L.C.; SILVA, K. S.; MAURO, M. A. Influence of edible coating on the drying and quality of papaya (*Carica papaya*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, p. 2828–2839, 2014.

GELY, M. C.; SANTALLA, E. M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 1029-1033, 2007.

GOMES, A. T.; CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. Desidratação osmótica: uma tecnologia de baixo custo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 3, n. 3, p. 212-226, 2007.

GONELI, A. L. D.; GONELLI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.

GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U.; OTTERDIJK, R. V. **Global food losses and food waste: extent, causes and prevention**. Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. 2011. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/mb060e/mb060e.pdf>> Acesso em: 21 mar. 2023.

KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

LASDON, L. S.; WARREN, A. D.; JAIN, A.; RATNER, M. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. **ACM Transactions on Mathematical Software**, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

MADAMBAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75-97, 1996.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. de C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MELO, J. C. S.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, K. P.; COSTA, C. H. C.; FEITOSA, R. M. Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 09-14, abr-jun, 2015.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-518, 2005.

OLANIPEKUN, B. F.; TUNDE-AKINTUNDE, T. Y.; OYELADE, O. J.; ADEBISI, M. G.; ADENAYA, T. A. Mathematical modeling of thin-layer pineapple drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, p. 1431-1441, 2015.

OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**, v. 16, n. 1, p. 112-113, 1973.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, n. 4, p. 314-321, 2015.

PEREIRA, A. **Avaliação da bioacessibilidade de compostos antioxidantes em variedades de maçã produzidas em Portugal**. 2014. 69f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.

REIS, F. R.; IVAHASHI, M. M.; ROSA, A. H. G. Effect of vacuum drying temperature on drying kinetics, effective moisture diffusivity and quality of peeled litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 2, p. 1-9, 2017.

REIS, R. C.; CÔRREA, P. C.; DEVILLA, I. A.; SANTOS, E. S.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Drying of yam starch (*Discorea* ssp.) and glycerol filmogenic solutions at different temperatures. **LWT**, v. 50, n. 2, p. 651-656, 2013.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L. B.; FIGUEIREDO, R. M. F.; COSTA, T. N. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, e2018031, 2019a.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Mathematical modeling for the annatto (*Bixa orellana* L.) seed drying process. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 73, p. 320-326, 2013.

SANTOS, L. G. Dos; FERNANDES, A. dos S.; DORIGON, M. F. B.; SANTOS, M. A. D.; GALANTE, R. M.; WERLE, L. O. Comparação da cinética de secagem de maçã argentina (*Malus domestica* ‘RED DELICIOUS’) e maçã verde (*Malus domestica* A ‘GRANNY SMITH’).

In: NETO, B. R. S. (Org.). **A Produção do Conhecimento nas Ciências da Saúde 2**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019b, cap. 21, p. 178–187.

SHARABIANI, V. R.; KAVEH, M.; ABDI, R.; SZYMANEK, M.; TANÁŠ, W. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. **Scientific Reports**, v. 11, 9155, 2021.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES J.P. Drying description of cylindrical pieces of bananas in different temperatures using diffusion models. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 3, p. 417-424, 2013.

SOUSA, E. P. D.; DE FIGUEIRÊDO, R. M.; GOMES, J. P.; QUEIROZ, A. J. D. M.; CASTRO, D. S. D.; LEMOS, D. M. Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 493-498, 2017.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; PESSOA-FILHO, P. A. (Eds) **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, v. 2, Rio de Janeiro: LTC, 2016.

UDOMKUN, P.; ARGYROPOULOS, D.; NAGLE, M.; MAHAYOTHEE, B.; JANJAI, S.; MÜLLER, J. Single layer drying kinetics of papaya amidst vertical and horizontal airflow. **Food Science and Technology**, v. 64, p. 67-73, 2015.

VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G. D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. **Drying Technology**, v. 8, n. 2, p. 323-342, 1990.

XANTHOPOULOS, G.; YANNIOTIS, S.; LAMBRINOS, G. R. Water diffusivity and drying kinetics of air drying of figs. **Drying Technology**, v. 27, p. 502-512, 2009.