



**MARIANA GONÇALVES SOUZA**

**SECAGEM DE FATIAS DE MAÇÃ PRÉ-TRATADAS COM  
ULTRASSOM**

**LAVRAS - MG**

**2018**

**MARIANA GONÇALVES SOUZA**

**SECAGEM DE FATIAS DE MAÇÃ PRÉ-TRATADAS COM ULTRASSOM**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da  
Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a)  
autor(a).**

Souza, Mariana Gonçalves.

Secagem de fatias de maçã pré-tratadas com  
ultrassom / Mariana Gonçalves Souza. - 2018.

45 p. : il.

Orientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Coorientador(a): Ednilton Tavares de Andrade.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade  
Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Malus doméstica L var Fuji. 2. microscopia  
eletrônica de varredura. 3. capacidade de reidratação. I.  
Gomes Corrêa, Jefferson Luiz. II. de Andrade, Ednilton  
Tavares. III. Título.

**MARIANA GONÇALVES SOUZA**

**SECAGEM DE FATIAS DE MAÇÃ PRÉ-TRATADAS COM ULTRASSOM**

**DRYING PRE-TREATED ULTRASOUND APPLE SLICED**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 05 de outubro de 2018.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade	UFLA
Prof. Dr. Roney Alves da Rocha	UFLA
Prof. Dr. Pedro Esteves D. Augusto	Esalq/USP

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2018**

*Aos meus pais Maria de Fátima e Edmar por todo incentivo e amor.  
Ao meu irmão Gabriel por toda amizade e carinho.  
Ao meu noivo Wagner por toda paciência, apoio, companheirismo e amor.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter chegado até aqui, por me amparar, proteger e cuidar. Obrigada por toda iluminação, coragem, fé e pela minha vida.

Agradeço aos meus pais Maria de Fátima e Edmar pelo apoio incondicional, torcendo e acreditando no meu crescimento pessoal e profissional. A eles todo meu amor e gratidão.

Ao meu irmão Gabriel, por todo aprendizado, irmandade, cuidado e amor.

Ao meu noivo Wagner por todo apoio, você foi mais que um namorado/noivo, você soube me acalmar e amparar, ajudou nos dados, na minha mudança de cidade e teve toda a paciência do mundo com as minhas crises. Obrigada por tudo!

Agradeço aos meus familiares por todo apoio, compreensão e carinho, entendendo minhas ausências e sempre com orações e vibrações boas. Em especial a minha Vó Edite, meu exemplo de fé.

A toda a família do Wagner, em especial seus pais Cristina e Brás, sua irmã Vanessa e nossa florzinha Gabriella. Obrigada por todo apoio emocional, essa vitória é de vocês da mesma forma que é dos meus pais. Obrigada por tudo!

As amigas Rafaela, Alana e Bárbara, que me ajudaram muito nessa transição da graduação para o mestrado. Sempre tiveram uma palavra amiga, um jantar a mesa, um apoio. Obrigada por tudo meninas!

Ao Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, pela orientação, ensinamentos, contribuição e paciência, fundamentais para conclusão desse trabalho. Agradeço também pelas brincadeiras, risadas e momentos de descontração. Jeff foi muito mais que um orientador, foi um amigo!

Ao meu coorientador Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade, pela confiança, ensinamentos e orientação durante este trabalho. Meu muito obrigada!

A banca examinadora, Dr. Roney Alves da Rocha e Dr. Pedro Esteves D. Augusto, pela disponibilidade e intercâmbio de ideias, sugestões e conhecimentos.

Aos amigos do Lab LEA (Amanda, Ana Luíza, Francemir, Gabriel, João Renato, Kamilla, Laís, Lucas, Paula e Ronaldo) vocês me abraçaram e me ensinaram muito de alimentos, obrigada pelos ensinamentos, compartilhamentos e todo cuidado. Desculpa minha curiosidade e até chatice, mas saibam que sem vocês essa dissertação não teria saído. Gratidão!

Aos amigos feitos na UFLA e aos amigos dos Alimentos e da Agrícola, pelos momentos compartilhados. Muito obrigada pela amizade e companheirismo.

Aos amigos, colegas e servidores do Departamento de Ciência dos Alimentos e Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a secretária da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Helen Cristina Carmo.

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, ao Departamento de Ciência dos Alimentos e ao Departamento de Engenharia Agrícola, que me proporcionaram o sonho de realizar o Mestrado em Engenharia Agrícola e pela estrutura concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES, FAPEMIG e CNPq, por proporcionarem condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

E a todos os que contribuíram, de forma direta ou indireta, para que este trabalho fosse realizado.

*Muito obrigada!*

## RESUMO GERAL

O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito da imersão em água com ou sem uso de ultrassom como um método de aumento de transferência de massa antes da secagem de fatias de maçãs. O pré-tratamento foi realizado em banho ultrassônico a 25 °C. A potência ultrassônica foi fornecida na frequência de 25 kHz por 10, 25 e 40 min no banho de ultrassom. Os tratamentos que não receberam as ondas de ultrassom ficaram imersos em água a 25 °C nos tempos 10, 25 e 40 min. O processo de secagem foi realizado após os pré-tratamentos em um secador túnel de vento com uma temperatura fixa de 70 °C e uma velocidade do ar de 1,5m/s. Os efeitos do pré-tratamento com ultrassom após a secagem foram investigados. Os modelos empíricos de Henderson & Pabis modificado e Page forneceram os melhores ajustes das curvas de secagem. Ela teve seu tempo reduzido em até 9% quando ocorreu pré-tratamento com ultrassom. Os pré-tratamentos melhoraram os parâmetros de qualidade da maçã, como a capacidade de reidratação, um parâmetro muito importante após a secagem.

**Palavras-chave:** microscopia eletrônica de varredura, cor, modelagem, *Malus doméstica* L. var Fuji, capacidade de reidratação.

## GENERAL ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the effect of immersion in water with or without the use of ultrasound as a method of increasing mass transfer before drying apple slices. Pretreatment was performed in an ultrasonic bath at 25 ° C. Ultrasonic power was supplied at 25 kHz frequency for 10, 25 and 40 min in the ultrasound bath. The treatments that did not receive the ultrasound waves were immersed in water at 25 °C in times 10, 25 and 40 min. The drying process was performed after pre-treatments in a wind tunnel dryer with a fixed temperature of 70°C and an air velocity of 1.5 m / s. The effects of pre-treatment with ultrasound after drying were investigated. The empirical models of Henderson & Pabis modified and Page provided the best adjustments of the drying curves. It had its time reduced by up to 9% when pre-treatment with ultrasound occurred. Pre-treatments improved the parameters of apple quality, such as rehydration capacity, a very important parameter after drying.

**Keywords:** scanning electron microscopy, color, modeling, *Malus domestic* L. var Fuji, rehydration capacity.



## Lista de ilustrações

Figura 1: Corte das fatias de maçã e do molde de inox, resultando em quadrados de lado de 2 cm x 2 cm. ....	21
Figura 2: Fotografia de fatia de maçã feita utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (A - Maçã fresca 600x). ....	31
Figura 3: Fotografias de fatias de maçã feitas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (A - água 40 minutos aumento 600x, B - água 40 minutos após secagem aumento 600x, C - ultrassom 40 minutos aumento 600x, D - ultrassom 40 minutos após secagem 600x). ....	32
Figura 4: Histograma com dados de encolhimento de fatias de maçã em função do tipo de tratamento após a secagem. ....	33
Figura 5: Histograma da capacidade de reidratação (%) de fatias de maçã em função do tipo de tratamento após a secagem. ....	34
Figura 6: Curvas de secagem, Razão de umidade (Kg/Kg m.s.) x Tempo (s). Tratamentos: IN, A10, A25, A40, U10, U25, U40. ....	35
Figura 7: Curvas de secagem, Umidade x Tempo (s). Tratamentos: Controle, A10, A25, A40, U10, U25, U40. ....	36
Figura 8: Comparação dos valores experimentais da razão de umidade (RU) experimental e prevista de acordo com equação de Henderson & Pabis modificado. ....	38
Figura 9: Comparação dos valores experimentais da razão de umidade (RU) experimental e prevista de acordo com equação de Page. ....	39

## Lista de tabelas

Tabela 1: Tratamentos utilizados no experimento: imersão em água, imersão em ultrassom e sem pré-tratamento (controle). .....	22
Tabela 2: O teor de água inicial dos frutos (peso/100 kg (b.s.)) .....	23
Tabela 3: Modelos matemáticos de regressão não-linear utilizados para predizer a curva de secagem de fatias de maçã ( <i>Malus domestica</i> L.) Fuji, em um secador convectivo. ....	26
Tabela 4: Tratamento de imersão em perda de água (PA), assistido por ultrassom (ultrassom) e sem uso de ultrassom (água). .....	28
Tabela 5: Valores de atividade de água em função do tipo de tratamento após a secagem. ....	29
Tabela 6: Parâmetros de cor para a maçã seca em função do tipo de tratamento. ....	30
Tabela 7: Dados de teores de água iniciais e finais dos experimentos de secagem em 13% de teor de água (b.u.).....	36
Tabela 8: Valores de P, SE, $X^2$ , RMSE, R e $R^2$ para o modelo de Henderson e Pabis modificado. ....	38
Tabela 9: Valores de P, SE, $X^2$ , RMSE, R e $R^2$ para o modelo de Page.....	39

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1 Maçã.....	13
2.2 Imersão em água como pré-tratamento .....	14
2.3 Secagem convectiva .....	15
<b>SEGUNDA PARTE .....</b>	<b>18</b>
<b>ARTIGO 1: DRYING PRE-TREATED ULTRASOUND APPLE SLICED.....</b>	<b>18</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>20</b>
<b>2 Material e métodos .....</b>	<b>20</b>
2.1 Material .....	20
2.2 Preparação das amostras.....	20
2.3 Experimentos .....	21
2.4 Imersão em água como pré-tratamento .....	22
2.5 Secagem convectiva .....	22
2.6 Análises qualitativas.....	23
2.6.1 Teor de água das fatias de maçã secas.....	23
2.6.2 Atividade de água .....	23
2.6.3 Análise de cor.....	23
2.6.4 Encolhimento.....	24
2.6.5 Capacidade de reidratação .....	25
2.6.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	25
2.7 Modelagem matemática.....	25
2.8 Análise estatística.....	27
<b>3 Resultados e discussão.....</b>	<b>27</b>
3.1 Imersão em água e ultrassom como pré tratamento.....	27
3.2 Análises qualitativas.....	28
3.2.1 Atividade de água ( $a_w$ ) .....	29

3.2.2	Análises de cor .....	29
3.2.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	30
3.2.4	Encolhimento e capacidade de reidratação .....	32
<b>3.3</b>	<b>Secagem convectiva .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4</b>	<b>Cinética de secagem – modelagem matemática.....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Agradecimentos .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>Referências .....</b>	<b>41</b>
<b>3.</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>44</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>45</b>
	<b>Resultados Modelagem Matemática .....</b>	<b>45</b>

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1. INTRODUÇÃO GERAL**

A maçã é fonte de vitaminas, com um excelente valor nutritivo, muito importante na alimentação humana. Ela é rica em vitaminas B1, B2, niacina, ferro e fósforo. No Brasil, sua produção se dá principalmente na região sul do Brasil, pois é um fruto de regiões frias e elevada altitude (acima de 800 metros).

As frutas destinadas ao mercado *in natura* alcançam preços mais elevados do que as frutas destinadas à indústria. Porém, requerem embalagem adequada e maiores cuidados no manuseio por parte dos produtores, em que ocorrem muitas perdas até chegar à mesa do consumidor. Por isto, a importância dos cuidados na pós-colheita, garantindo que o produto chegue íntegro e com qualidade para o consumo. No mercado brasileiro existem diferentes processos de industrialização de maçã como: sucos, purês, doces, vinagres, chás, polpas, dentre outros produtos.

Uma das formas de conservação e elaboração de produtos à base de maçã é a secagem, que é uma alternativa que garante a conservação das frutas e a sua disponibilidade o ano todo no mercado. O uso de ultrassom em imersão como pré-tratamento da secagem pode minimizar os danos causados nos alimentos pelo uso de temperaturas elevadas, na secagem, devido ao menor tempo de exposição do alimento no secador.

Desta forma, objetivo deste trabalho é determinar o efeito da aplicação de ultrassom em pré-tratamentos de imersão e posterior secagem convencional de fatias de maçã em relação aos parâmetros de qualidade (cor, capacidade de reidratação, encolhimento e microscopia eletrônica de varredura).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Maçã

A maçã é o pseudofruto pomáceo da macieira (*Malus domestica*), árvore da família *Rosaceae*. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de frutos. A maior parte da produção é absorvida pelo mercado interno e a maçã está entre as principais frutas produzidas, precisando de altitudes maiores que 800 metros, sendo que a maior produção está no sul do país (FIORRAVANÇO, J. C.; SANTOS, 2013).

As maçãs são uma das principais frutas consumidas em todo o mundo e também fazem parte de muitos produtos alimentícios. Mais de 90% da produção brasileira corresponde a estas cultivares Gala e Fuji. A Gala é conhecida pelo seu aroma e sabor, enquanto a Fuji pela sua crocância e suculência. As áreas exatas de cultivo e os volumes produzidos são bem complicados de se determinar, pois uma grande parte da produção ocorre em pequenas propriedades rurais e os frutos são para consumo familiar ou vendas no comércio local (OCDE-FAO, 2015). Na última década, tem-se dedicado à produção de produtos orgânicos e a assistência técnica ao produtor rural tem sido ampliada por diversos órgãos governamentais e ONG's, melhorando assim as formas de cultivo.

Há mais de 7.500 espécies e variedades de maçãs. As diferentes espécies encontram-se em climas temperados e subtropicais, já que macieiras não florescem em áreas tropicais, pois necessitam de um número considerável de horas de frio, que é variável em função da variedade cultivada. A colheita da maçã ocorre de dezembro a maio, mas se pode encontrar maçã o ano todo, devido ao armazenamento em câmaras frias. Segundo Fiorravanço e Santos (2013), aproximadamente 80% da produção é para o consumo *in natura* e apenas 20% passa por algum tipo de processamento.

As maçãs são boas fontes de vitaminas B2, B3, B5 e B6 e também contêm vitaminas A, B1 e E em quantidades menores (FERNANDES et al., 2015). O papel da indústria de alimentos na conservação desses produtos é importante para a redução das perdas, de modo a garantir segurança e qualidade, além de estender a vida útil dos alimentos. Contudo há necessidade em se aliar técnicas tradicionais, combinadas com tecnologias recentes para otimizar os processos de conservação (YADAV; SINGH, 2012).

## 2.2 Imersão em água como pré-tratamento

A imersão de uma matriz alimentícia em água pode ser utilizada como pré-tratamento para a secagem. O pré-tratamento com ultrassom consiste na imersão da fruta em água ou em uma solução osmótica à qual é aplicado o ultrassom. Ele pode ser realizado a temperatura ambiente, reduzindo a probabilidade de degradação de alimentos (FERNANDES; RODRIGUES, 2008). Os processos realizados com ultrassom são uma tecnologia inovadora e relativamente nova na indústria de alimentos e ao longo dos anos vem crescendo as pesquisas sobre os seus usos (FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2009).

Deve-se toda vez que utilizar o banho de ultrassom, ter uma imersão em algum líquido, pois ele é necessário para a propagação das ondas ultrassônicas, podendo ser em água ou alguma solução osmótica de interesse. No ultrassom ocorre da mesma forma que a desidratação osmótica convencional, ele é um processo que pode ser realizado na temperatura ambiente, ou seja, sem exigência de aquecimento, reduzindo as probabilidades de degradação dos alimentos (FUENTE-BLANCO et al., 2006). Neste processo ocorre uma difusão dos sólidos para a água, e esta imersão promove dois fluxos em contracorrente: a transferência parcial de água, para o interior do alimento e a difusão de sólidos solúveis do alimento para água. Além desse fluxo contracorrente, o uso de ultrassom causa uma série de contrações e expansões rápidas do tecido, agitando o interior das células, num efeito comumente chamado de “efeito esponja”, de forma semelhante a uma esponja, quando se aperta e solta repentinamente. Esse efeito pode remover a água da matriz para a água do banho ultrassônico, quando utilizado o ultrassom em soluções osmóticas, absorvendo solução para a matriz, ocasionando uma perda de água e um ganho de solutos (GARCIA-NOGUERA et al., 2010). No caso do ultrassom com imersão em água, ocorre o contrário, tem a entrada de água na matriz e a saída de solutos para o banho (NOWACKA et al., 2012).

Quando se utiliza água destilada como meio de imersão em ultrassom, ocorre um ganho de água no produto, devido a diferença de potencial osmótico juntamente com um fenômeno chamado cavitação, que pode ser útil para remover umidade fortemente conectada (AZOUBEL et al., 2015). Este fenômeno ocorre quando a aplicação do ultrassom leva à uma maior formação, crescimento e colapso de bolhas, com a geração ou até mesmo uma ampliação dos micro canais que facilitam a movimentação dos líquidos e gases no interior do fruto, gerando micro jatos e provoca a injeção de água destilada nos alimentos, aumentando assim as taxas de transferência de massa interna e externa dos alimentos (FUENTE-BLANCO et al., 2006;

FERNANDES; GALLA; RODRIGUES, 2008; FERNANDES; RODRIGUES, 2007, 2008; CÁRCEL; BENEDITO; MULET, 2012; CORRÊA et al., 2015).

A cavitação é responsável pela redução da resistência externa à transferência de massa para o interior do alimento, enquanto o efeito esponja reduz a resistência interna, com aumento da difusividade, do teor de água quanto de solutos, no caso de uso de soluções osmóticas (SIMAL et al., 1998; FERNANDES; RODRIGUES, 2007). O uso do ultrassom associado com a imersão em água é uma técnica eficiente para aumentar as taxas de secagem e perda de água (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; AZOUBEL et al., 2010). A aplicação do ultrassom e sua influência sobre as taxas de secagem, irá depender das características do produto e do tempo de aplicação das frequências ultrassônicas (CÁRCEL; BENEDITO; MULET, 2012).

Corrêa *et al.* (2017), utilizaram o ultrassom como pré-tratamento para a secagem convectiva de fatias de abacaxi. O secador utilizado era composto por uma câmara de secagem onde tem um ultrassom acoplado, de onde era disparado as ondas ultrassônicas durante um tempo pré-determinado. As amostras que receberam as ondas de ultrassom apresentaram uma maior taxa de secagem em relação as que não sofreram, utilizando como comparação o mesmo teor de água. Fernandes *et al.* (2015), verificaram que a aplicação de ultrassom reduziu o tempo de secagem de maçãs. Os autores verificaram que a vantagem do uso das ondas de ultrassom aumentou a medida que a velocidade do ar e a temperatura eram mais baixas, ou seja, a 45,0 °C e 1,0 m/s de velocidade do ar, a difusividade efetiva da água para o processo assistido por ultrassom foi 54,0% maior do que o processo convencional e a redução do tempo foi 35% menor. A aplicação de ultrassom foi capaz de auxiliar o aumento da disponibilidade da forma livre de algumas vitaminas, porém a temperatura de secagem é o principal fator influente na quantidade final de vitaminas, contradizendo a ideia que produtos secos apresentam menor valor nutricional, quando comparado com o fruto *in natura*.

### **2.3 Secagem convectiva**

A secagem de alimentos é amplamente utilizada para conservar os mesmos por um maior período de tempo. Com a secagem consegue-se agregar valor ao produto, aumentar o seu valor de mercado e pode-se ainda ter novas possibilidades de produtos que não se poderia ter com ele na sua versão fresca (um exemplo seria o tomate seco, iguaria muito utilizada na culinária). De acordo com Coestino (2010), a secagem aumenta a vida útil do produto devido



à redução do teor de água. Colestino (2010), ainda cita a facilidade no transporte, pois diminui o peso do alimento mantendo sua qualidade final por longos períodos de tempo, além da economia em transporte, mão de obra e armazenamento.

Na secagem convectiva pode-se controlar algumas variáveis do sistema, como a temperatura, velocidade do ar e massa dos frutos durante todo processo, podendo ao final, ter um produto seco com qualidade e uma boa aceitação, garantindo também a segurança alimentar. A secagem é uma operação de transferência de calor e massa muito importante, que tem a finalidade de preservar o produto e como consequência manter o mesmo por um maior tempo de armazenamento. Ela é um processo complexo que sofre diferentes mudanças em sua composição química, estrutural e propriedades físicas (MAYOR; SERENO, 2004).

Estudos mostram que pré-tratamentos antes da secagem convectiva podem melhorar a qualidade do produto final, devido ao menor tempo de exposição no secador, pois eles diminuem significativamente o tempo de secagem em comparação aos frutos que seguiram diretamente para o secador (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; AZOUBEL et al., 2010; NOWACKA et al., 2012; CORRÊA et al., 2017).

Fernandes et al. (2015) pesquisaram a influência da secagem convectiva assistida por ultrassom sobre a desidratação osmótica da maçã (*Malus domestica* L.) variedade Royal Gala, e sua influência na disponibilidade de vitaminas A, B1, B2, B3, B5, B6 e E no produto seco. Aqueles autores verificaram que as aplicações das ondas ultrassônicas aumentaram a disponibilidade de alguns tipos de vitaminas na fruta seca, como B1, B2, B3 e B6.

Segundo Magalhães et al. (2017) a combinação do pré-tratamento ultrassônico e a secagem ao ar assistida por ultrassons intensificou o processo de secagem de maçã (variedade gala), proporcionando um aumento da difusividade efetiva da água em até 93%, um aumento da transferência de massa externa em até 30% e uma redução de até 58% no tempo total de secagem quando comparado ao processo convencional de secagem ao ar.

O tratamento com ultrassom de cubos de maçã causou redução do tempo de secagem em 31-40% em comparação com a amostra não tratada. O material tratado com ultrassom mostrou entre 9% e 11% maior encolhimento, 6-20% menor densidade (densidade aparente de acordo com a massa dos frutos) e porosidade de 9-14% maior que as amostras não tratadas. Diferenças consideráveis na densidade e porosidade da maçã seca com e sem aplicação de ondas ultrassônica foram confirmadas pela análise das imagens de tecido feitas com a microscopia eletrônica de varredura, evidenciando que o pré-tratamento altera as condições iniciais da secagem convectiva (NOWACKA et al., 2012).

A aplicação da desidratação osmótica assistida por ultrassom em morangos proporcionou uma maior redução do tempo de secagem. O pré-tratamento realizado por 30 minutos, imersos em solução osmótica a 50%, resultou nas maiores taxas de secagem entre os pré-tratamentos, na frequência de 25 kHz (GARCIA-NOGUERA et al., 2010). Isso evidencia o diferencial em utilizar o ultrassom como pré-tratamento para a secagem, pois o mesmo diminui o tempo que a matriz fica exposta as temperaturas de secagem, preservando as características da mesma.

Ressalta-se então a importância da secagem como uma alternativa na conservação de frutas, disponibilizando o produto nos períodos de entressafra (MENDONÇA et al., 2016; JUNQUEIRA, 2017).

**SEGUNDA PARTE****ARTIGO 1: DRYING PRE-TREATED ULTRASOUND APPLE SLICED****SECAGEM DE FATIAS DE MAÇÃ PRÉ-TRATADAS COM ULTRASSOM****Name(s) of Author(s)**

Mariana Gonçalves Souza<sup>1</sup>; Jefferson Luiz Gomes Corrêa<sup>2</sup>, Amanda Umbelina de Souza<sup>2</sup>; Paula Giarolla Silveira<sup>2</sup>; Ednilton Tavares de Andrade<sup>1</sup>

**Author Affiliation(s)**

<sup>1</sup>Department of Agricultural Engineering, Federal University of Lavras, Lavras, MG, Brazil.

Postal address: Departamento de Engenharia Agrícola, Campus Universitário, Caixa postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup>Department of Food Science, Federal University of Lavras, Lavras, MG, Brazil.

Postal address: Departamento de Ciência dos Alimentos, Campus Universitário, Caixa postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

**(Artigo a ser submetido para publicação no periódico Journal of the Science of Food and Agriculture)**

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito da imersão em água com ou sem uso de ultrassom como um método de aumento de transferência de massa antes da secagem de fatias de maçãs. O pré-tratamento foi realizado em banho ultrassônico a 25 °C. A potência ultrassônica foi fornecida na frequência de 25 kHz por 10, 25 e 40 min no banho de ultrassom. Os tratamentos que não receberam as ondas de ultrassom ficaram imersos em água a 25 °C nos tempos 10, 25 e 40 min. O processo de secagem foi realizado após os pré-tratamentos em um secador túnel de vento com uma temperatura fixa de 70 °C e uma velocidade do ar de 1,5m/s.. Os efeitos do pré-tratamento com ultrassom após a secagem foram investigados. Os modelos empíricos de Henderson & Pabis modificado e Page forneceram os melhores ajustes das curvas de secagem. Ela teve seu tempo reduzido em até 9% quando ocorreu pré-tratamento com ultrassom. Os pré-tratamentos melhoraram os parâmetros de qualidade da maçã, como a capacidade de reidratação, um parâmetro muito importante após a secagem.

**Palavras-chave:** microscopia eletrônica de varredura, cor, modelagem, *Malus doméstica* L. var Fuji, capacidade de reidratação.

## 1 Introdução

A maçã é fonte de vitaminas, com um excelente valor nutritivo, muito importante na alimentação humana. Ela é rica em vitaminas B1, B2, niacina, ferro e fósforo. A pós-colheita é uma etapa muito importante, pois ela tem a função de garantir que o produto chegue saudável e com qualidade para o consumo. Neste ponto entra a secagem, a fim de conservar e minimizar as perdas dos frutos para o consumidor final (CORRÊA FILHO et al., 2018; JUNQUEIRA et al., 2017).

A secagem é uma alternativa que garante a conservação das frutas e a sua disponibilidade o ano todo no mercado, porém a secagem convencional tem um custo elevado, fazendo com que se busque alternativas para diminuir esse elevado gasto energético. O pré-tratamento com uso de ultrassom consiste na imersão de uma matriz em uma solução aquosa onde as ondas ultrassônicas são aplicadas. Elas causam uma série de contrações e expansões rápidas do tecido, agitando o interior das células, num efeito comumente chamado de “efeito esponja”, onde se tem a formação de canais microscópicos que distorcem e até rompem as células do tecido, facilitando a transferência de água da matriz para a água do banho ultrassônico (NOWACKA et al., 2012). O uso de ultrassom em imersão de alimentos em água destilada como pré-tratamento da secagem pode minimizar os danos causados pelo uso de temperaturas elevadas, na secagem (AZOUBEL et al., 2010; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; NOWACKA et al., 2012), devido a um menor tempo de exposição na secagem posterior ao pré-tratamento.

O objetivo desta pesquisa foi de investigar a influência da imersão de fatias de maçã em água com ou sem uso de ultrassom como pré tratamento na secagem destas fatias, com relação à fatores de qualidade como cor, capacidade de reidratação, microestrutura e encolhimento. A evolução da secagem com o tempo foi modelada com modelos matemáticos representativos de fenômeno encontrados na literatura.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Material

As maçãs (*Malus domestica* L.) variedade Fuji foram adquiridas no comércio local de Lavras, MG. Para que tivessem homogeneidade, as frutas foram escolhidas uniformemente quanto ao tamanho, peso, cor e firmeza.

### 2.2 Preparação das amostras

As maçãs foram lavadas em água corrente e tiveram sua casca extraída. Os frutos foram cortados em fatias de espessura de  $0,00385 \pm 0,00031$  m (essa espessura foi aferida com a ajuda

de um paquímetro digital) e as sementes da maçã retiradas. As amostras tiveram o formato de quadrados de lado de 2 cm x 2 cm, resultando em uma área de 0,0004 m<sup>2</sup>, sendo feitas com a ajuda de um molde de inox (figura 1). A escolha do formato está relacionada diretamente com a facilidade de obtenção de modelos cinéticos baseado na geometria quadrática.

Figura 1: Corte das fatias de maçã e do molde de inox, resultando em quadrados de lado de 2 cm x 2 cm.



Fonte: Da autora (2018).

### 2.3 Experimentos

O trabalho contou com 6 tratamentos e um controle (tabela 1), onde todos os experimentos foram realizados em triplicata. Foi utilizada a água destilada como meio de imersão, devido ao seu menor potencial químico. As amostras foram avaliadas *in natura* e logo após o processamento. A caracterização para os frutos *in natura* e processados foram quanto ao teor de água, atividade de água, cor, microscopia eletrônica de varredura, capacidade de reidratação e encolhimento (depois da secagem). As análises qualitativas também foram realizadas em triplicata.

Tabela 1: Tratamentos utilizados no experimento: imersão em água, imersão em ultrassom e sem pré-tratamento (controle).

Tratamentos		
Pré-tratamento		
Água	10	A10
	25	A25
	40	A40
Ultrassom	10	U10
	25	U25
	40	U40
Sem pré-tratamento		
Controle	<i>In natura</i>	IN

Fonte: Da autora (2018).

#### 2.4 Imersão em água como pré-tratamento

As amostras foram divididas em 2 grupos: o primeiro utilizou apenas água destilada como meio de imersão (A10, A25 e A40), e o segundo utilizou água destilada combinada com ondas de ultrassom (U10, U25 e U40). As amostras ficaram imersas em água nos tempos 10, 25 e 40 minutos na proporção de pelo menos 1:4 (p/p) para evitar efeitos de diluição nos processos com solução (GARCIA-NOGUERA et al., 2010). Para a aplicação das ondas ultrassônicas, as amostras foram colocadas diretamente na câmara do banho (Unique, modelo USC 2850<sup>a</sup>, Indaiatuba, Brasil), com uma frequência de 25kHz e temperatura de 25 °C, nos tempos de 10, 25 e 40 minutos. Esses tempos foram selecionados a partir de trabalhos de outros autores, tomate (CORRÊA et al., 2015), banana (AZOUBEL et al., 2010), maçã (NOWACKA et al., 2012), kiwi (NOWACKA et al., 2014) frutas (FERNANDES; RODRIGUES, 2007), pois sabe-se que após 30 a 45 minutos de tratamento as ondas ultrassônicas já não fazem mais efeito.

#### 2.5 Secagem convectiva

A secagem convectiva foi realizada em um secador túnel de vento (MD018 – Bancada de secagem, Eco Educacional, São José, Brasil). Após os pré-tratamentos, as amostras seguiram para o secador, com uma temperatura fixa de 70 °C e uma velocidade do ar de 1,5 m/s., que foram escolhidos de acordo com a literatura (JANOWICZ; LENART, 2015; NOWACKA et al., 2012). As amostras foram controladas ao longo do tempo por um cronômetro e uma balança

digital (Marte científica, modelo AD33000, Brasil) acoplada ao secador. O teor de água da maçã seca foi determinado em estufa a 70°C (AOAC, 2010). Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata.

## 2.6 Análises qualitativas

### 2.6.1 Teor de água das fatias de maçã secas

O teor de água das fatias de maçã secas (tabela 2) foi determinado por secagem em estufa de vácuo a 70 °C até o peso ser constante, realizado conforme metodologia proposta pela (AOAC, 2010). As análises foram realizadas em triplicata.

Tabela 2: O teor de água inicial dos frutos (peso/100 kg (b.s.))

Tratamento	Teor de água com desvio	%
IN	85,02 ± 0,52 kg	85,0
A10	86,50 ± 0,87 kg	86,5
A25	87,58 ± 1,00 kg	88,0
A40	88,70 ± 0,77 kg	89,0
U10	86,52 ± 0,24 kg	86,5
U25	88,37 ± 0,14 kg	88,0
U40	90,10 ± 0,21 kg	90,0

Fonte: Da autora (2018).

### 2.6.2 Atividade de água

A determinação da atividade de água ocorreu à temperatura de 25°C com o uso do equipamento Aqualab, modelo CX-2T (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA). As análises foram realizadas em triplicata. O fruto fresco apresentou uma atividade de água ( $a_w$ ) de  $0,987 \pm 0,007$ .

### 2.6.3 Análise de cor

A coloração das amostras foi realizada com colorímetro eletrônico Minolta CR 400 (Minolta Câmera Co. Ltd, Osaka, Japan) a 25°C, de acordo com os padrões L\* (luminosidade), a\* (vermelho a verde), e b\* (amarelo a azul), ângulo Hue ( $h^\circ$ ) e chroma (C\*), calibrado com uma placa branca para cada série de medições. O índice colorimétrico de diferença total de cor ( $\Delta E$ ) representa a alteração ocorrida na coloração do produto, considerando-se que o índice 0



indica o produto fresco, calculado pela equação (1) (ORIKASA et al., 2014). Cada amostra foi aleatoriamente medida em três locais e a média foi relatada.

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

A maçã fresca apresentou:  $L^*$  de  $71,68 \pm 3,24$ ,  $a^*$  de  $-5,27 \pm 1,60$ ,  $b^*$   $24,78 \pm 2,47$ , ângulo Hue ( $h^\circ$ ) de  $102,25 \pm 4,39$  e chroma ( $C^*$ ) de  $25,40 \pm 2,21$ .

#### 2.6.4 Encolhimento

As dimensões das amostras foram medidas na condição *in natura*, após o pré-tratamento e após a secagem. As amostras foram fotografadas no mesmo instante da medição, podendo assim determinar o volume pelo método de análise de imagens. A área superficial foi medida diretamente pelas fotografias, por meio de cinco amostras diferentes. Cinco amostras foram avaliadas para cada tratamento durante a secagem. A análise de imagem foi realizada através do software livre Image J® 1.45s, para obtenção da área superficial da amostra. O software livre Image J® 1.45s relaciona o tamanho do objeto na imagem ao tamanho no mundo real, por isso a importância da escala da imagem (NAHIMANA; MUJUMDAR; ZHANG, 2011). Ao capturar as imagens e salvá-las no computador o software é capaz de converter o número de pixels dos pedaços de maçã para as dimensões reais. Os dados de volume aparente foram obtidos multiplicando-se a área superficial fotografada pela espessura média do material. Para o cálculo do encolhimento das amostras secas do controle, utilizou-se os dados da amostra fresca como volume inicial e da amostra seca como volume final. Para o cálculo dos demais tratamentos (A10, A 25, A40, U10, U25, U40) utilizou-se os dados de volume inicial os valores obtidos após o pré-tratamento e como volume final os da amostra após a secagem. Para cada amostra, a espessura em cinco pontos diferentes foi determinada usando um paquímetro digital (modelo DC-6; Western, China). O encolhimento (S) foi determinado de acordo com a equação 2, onde um valor S maior indica uma maior contração.

$$S = \left(1 - \frac{V_f}{V_0}\right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde:

$V_f$  indica o volume final após a secagem ( $m^3$ ); e,

$V_0$  indica o volume inicial ( $m^3$ ).

### 2.6.5 Capacidade de reidratação

A capacidade de reidratação consistiu na imersão das amostras secas de maçã em água destilada à 25 °C por 80 minutos. Em um béquer de vidro foi colocado 100 mL de água com aproximadamente 1 grama de amostra, que foram pesadas com auxílio de uma balança analítica (modelo AUY 220, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japão) (LEWICKI; VU LE; POMARAŃSKA-ŁAZUKA, 2002; NOWACKA et al., 2012).

A capacidade de reidratação (CR) foi calculada pela equação 3, onde  $W_r$  é a massa da amostra após reidratação (kg), e  $W_s$  é a massa do material seco (kg).

$$CR(\%) = \frac{W_r - W_s}{W_s} \times 100 \quad (3)$$

### 2.6.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras frescas e tratadas foram fixadas em solução modificada de Karnovsky (GUIMARÃES et al., 2009). Após 24 h, elas foram transferidas para glicerol 30% durante 30 minutos, imersas em nitrogênio líquido e quebradas sobre uma superfície metálica resfriada com nitrogênio líquido usando um bisturi. Posteriormente, foram fixadas em tetróxido de ósmio 1% por 1 hora. As amostras foram lavadas em água destilada por três vezes seguidas e então, desidratadas por tratamentos sequenciais com uma série graduada de soluções de acetona (25%, 50%, 75%, 90% e 100% (p/p)). Cada tratamento levou aproximadamente 10 min e o tratamento com 100% de acetona foi repetido três vezes. Para completar a secagem, um secador de ponto crítico (CPD 030, Bal-Tec, Balzers, Liechtenstein) foi usado para obter um material completamente seco. As amostras foram então fixadas em um suporte com fita dupla face, em seguida foram revestidas com ouro em um evaporador a vácuo (SDC 050, Bal-Tec, Balzers, Liechtenstein), para estabilizar a estrutura de acordo com o método descrito por Xiao et al. (2008). Depois disso, as amostras preparadas foram observadas em um microscópio (LEO EVO 040, empresa Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen, Alemanha).

## 2.7 Modelagem matemática

Os dados experimentais da secagem foram ajustados em onze equações de secagem de camada fixa (Tabela 3). A razão de umidade (RU) das amostras durante os experimentos de secagem foi calculada usando a equação 4:

$$RU = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \approx \frac{X_t}{X_0} \quad (4)$$

Onde RU - razão de umidade [adimensional];

$X_t$  - teor de água em qualquer momento da secagem [kg H<sub>2</sub>O / kg b.s.];

$X_{eq}$  - teor de água inicial [kg H<sub>2</sub>O / kg b.s.];

$X_0$  - teor de água de equilíbrio [kg H<sub>2</sub>O / kg b.s.].

Nas condições experimentais, o  $X_{eq}$  é relativamente pequeno comparado a  $X_0$ . Portanto, seu valor foi numericamente definido para zero (JUNQUEIRA, J.R.DE J.; CORRÊA, J.L.G; ERNESTO, 2017; JUNQUEIRA et al., 2017).

Tabela 3: Modelos matemáticos de regressão não-linear utilizados para predizer a curva de secagem de fatias de maçã (*Malus domestica* L.) Fuji, em um secador convectivo.

Modelo	Equação	Ref. N°
<b>Difusão</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	(5)
<b>Dois Termos</b>	$RU = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(6)
<b>Exponencial de Dois Termos</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$	(7)
<b>Henderson &amp; Pabis</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(8)
<b>Henderson &amp; Pabis Modificado</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(9)
<b>Logarítmico</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	(10)
<b>Midilli et al.</b>	$RU = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(11)
<b>Newton</b>	$RU = \exp(-k \cdot t)$	(12)
<b>Page</b>	$RU = \exp(-k \cdot t^n)$	(13)
<b>Page Modificado</b>	$RU = \exp[-(k \cdot t)^n]$	(14)
<b>Wang &amp; Sing</b>	$RU = 1 + at + bt^2$	(15)

Onde: RU é a razão de umidade [adimensional], t é o tempo de secagem [s] e a, b, n e k são constantes empíricas e coeficientes nas equações de secagem.

Fonte: ( MOHAPATRA; RAO, 2005; MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, 1996).

Avaliou-se o grau de ajuste dos modelos aos dados experimentais com base na magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), erro quadrático médio (RMSE), qui-quadrado reduzido ( $\chi^2$ ), conforme descrito nas Eqs. 16, 17, 18 e 19 (CORRÊA FILHO et al., 2018; MOHAPATRA; RAO, 2005; AFONSO JÚNIOR, P.C. & CORRÊA, 1999; MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, 1996).

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y-Y_0|}{Y} \quad (16)$$

$$SE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (Y-Y_0)^2}{DF} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - Y_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y-Y_0)^2}{N} \quad (19)$$

em que:

Y - valores experimentais, adimensional;

Y<sub>0</sub> - valores estimados pelo modelo, adimensional;

DF - graus de liberdade do modelo; e,

N - número de observações.

Portanto, para ser considerado de bom ajuste, o modelo deve alcançar valores de coeficiente de regressão linear ( $R^2$ ) mais elevados e próximos possíveis da unidade (1,0) e, concomitantemente, os valores de P (%), RMSE e  $\chi^2$  mais baixos e próximos de zero (DOYMAZ; SMAIL, 2011; HASSAN-BEYGI et al., 2009).

## 2.8 Análise estatística

Todas os tratamentos foram realizados em triplicata e os resultados foram analisados por análise de variância multifatorial com nível de significância de 95% usando Statistica® 7.0.

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Imersão em água e ultrassom como pré tratamento

Na tabela 4 pode-se observar os resultados encontrados nos processos de imersão em água e imersão em água com uso de ultrassom, ocorreu um acréscimo do teor de água, ou seja, a perda de água (PA) foi negativa nos tratamentos com imersão em água, com ou sem presença de ultrassom. Ocorreu diferença significativa dentro de cada tratamento de imersão, no uso de ultrassom, o tempo de 40 minutos foi o que mais absorveu água, como pode-se ver na tabela 4.

Entre os tratamentos só ocorreu diferença significativa no tempo de 40 minutos, em que o tratamento com uso de ultrassom foi melhor do que o sem o uso. Os tempos de 10 e 25 minutos não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. Observa-se que na imersão em água com uso de ultrassom os frutos absorveram uma maior quantidade de água. Este fato ocorreu devido a uma diferença de concentração entre a água destilada e o fruto, ocasionando um transporte passivo do meio hipotônico para o meio hipertônico para que ocorra o equilíbrio osmótico. Neste processo se tem dois fluxos contracorrentes: a transferência parcial de água para o interior do alimento e a difusão de sólidos solúveis do alimento para a água. Além desse fluxo contracorrente, no caso dos tratamentos com uso do ultrassom, ocorre uma série de contrações e expansões rápidas do tecido, agitando o interior das células, num efeito comumente chamado de “efeito esponja”, onde se tem a formação de canais microscópicos que distorcem e até rompem as células do tecido, facilitando a transferência de água da matriz para a água do banho ultrassônico (NOWACKA et al., 2012). Quando se utiliza água destilada como meio de imersão com uso de ultrassom, ocorre um ganho de água no produto, devido ao fenômeno chamado cavitação. Esse fenômeno ocorre quando a aplicação do ultrassom leva à uma maior formação ou até mesmo uma ampliação dos micro canais que facilitam a movimentação dos líquidos e gases no interior do fruto, gerando micro jatos e provoca a injeção de água destilada nos alimentos, aumento assim as taxas de transferência de massa interna e externa dos alimentos (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; CÁRCEL; BENEDITO; MULET, 2012; CORRÊA et al., 2015), resultados semelhantes foram relatados em maçã (NOWACKA et al., 2012), morango (GARCIA-NOGUERA et al., 2010), banana (AZOUBEL et al., 2010), kiwi (NOWACKA et al., 2014), tomate (CORRÊA et al., 2015), banana, jenipapo, jambo, mamão, pinha (FERNANDES; RODRIGUES, 2008).

Tabela 4: Tratamento de imersão em perda de água (PA), assistido por ultrassom (ultrassom) e sem uso de ultrassom (água).

Tempo (min)	PA (%)				
	Ultrassom		desvio	Água	desvio
10	-0,480 <sup>c</sup>	±	0,347	-1,450 <sup>b</sup>	± -0,276
25	-1,992 <sup>b</sup>	±	0,477	-2,521 <sup>ab</sup>	± -0,378
40	-5,082 <sup>a</sup>	±	0,250	-3,656 <sup>a</sup>	± -0,305

Fonte: Da autora (2018).

### 3.2 Análises qualitativas

### 3.2.1 Atividade de água ( $a_w$ )

As alterações do teor e atividade da água são acompanhadas do encolhimento de frutos secos, que está relacionado tanto com a morfologia do tecido de maçãs quanto com o mecanismo de secagem de materiais porosos (JANOWICZ; LENART, 2015). A atividade de água de um alimento seco indica a qualidade e estabilidade do produto. Valores abaixo de 0,600 indicam uma estabilidade microbiológica (SAGRIN; CHONG, 2013). Como todos os tratamentos após a secagem (Tabela 5) tiveram valores abaixo de 0,600, as amostras secas podem ser consideradas micro-biologicamente estáveis.

Tabela 5: Valores de atividade de água em função do tipo de tratamento após a secagem.

	$a_w$ final
IN	0,437 ± 0,037
A10	0,527 ± 0,137
A25	0,417 ± 0,028
A40	0,503 ± 0,170
U10	0,471 ± 0,056
U25	0,462 ± 0,013
U40	0,478 ± 0,050

Fonte: Da autora (2018)

### 3.2.2 Análises de cor

Os parâmetros de cor das fatias de maçã foram significativamente afetados pelo pré-tratamento (Tabela 6) ( $p < 0,05$ ). A maçã fresca apresentou um  $L^*$  de  $71,68 \pm 3,24$ ,  $a^*$  de  $-5,27 \pm 1,60$ ,  $b^*$   $24,78 \pm 2,47$ , ângulo Hue ( $h^\circ$ ) de  $102,25 \pm 4,39$  e chroma ( $C^*$ ) de  $25,40 \pm 2,21$ . Observamos um aumento nos valores de  $L^*$  e  $b^*$  (mais claros e mais amarelos) e uma diminuição nos valores de  $a^*$  (menos avermelhados) após a secagem pré-tratada. Acredita-se que a imersão em água reduziu a taxa oxidativa das fatias de maçã, diminuindo significamente o escurecimento das mesmas. A diferença geral de cor das frutas secas pode ser representada pelo valor da diferença total de cor ( $\Delta E$ ). Uma diferença significativa foi encontrada no  $\Delta E$  das maçãs secas ( $p < 0,05$ ). A diferença total de cor ( $\Delta E$ ) dos frutos não tratados foi significativamente maior do que dos frutos pré-tratados, de acordo com Teste de Tukey. Com esses valores pode-se dizer que a maçã que passou por pré-tratamentos com água e ultrassom manteve a sua cor, não causando impactos negativos quanto a este quesito. Observa-se uma qualidade positiva que precisa de mais estudos futuros.

Tabela 6: Parâmetros de cor para a maçã seca em função do tipo de tratamento.

	$\Delta E$	L*	a*	b*	cr	hue
IN (Controle)	14,68±2,02 <sup>a</sup>	78,45±3,88 <sup>a</sup>	-1,36±3,01 <sup>bcd</sup>	35,98±2,49 <sup>a</sup>	36,12±2,50 <sup>a</sup>	92,26±4,73 <sup>abc</sup>
A10	11,65±1,67 <sup>b</sup>	79,63±2,49 <sup>a</sup>	-2,53±1,64 <sup>d</sup>	32,30±1,77 <sup>b</sup>	32,44±1,81 <sup>b</sup>	94,45±2,81 <sup>a</sup>
A25	11,21±1,96 <sup>b</sup>	76,29±4,07 <sup>ab</sup>	0,55±2,43 <sup>abc</sup>	31,38±3,28 <sup>b</sup>	31,47±3,32 <sup>b</sup>	89,38±4,37 <sup>bcd</sup>
A40	11,49±0,87 <sup>b</sup>	73,82±2,98 <sup>b</sup>	1,86±1,71 <sup>a</sup>	32,88±0,99 <sup>b</sup>	32,97±0,96 <sup>b</sup>	86,73±3,01 <sup>d</sup>
U10	11,81±2,07 <sup>b</sup>	80,01±3,49 <sup>a</sup>	-1,86±2,37 <sup>cd</sup>	31,09±2,59 <sup>b</sup>	31,28±2,50 <sup>b</sup>	93,59±4,48 <sup>ab</sup>
U25	11,25±1,33 <sup>b</sup>	76,86±2,96 <sup>ab</sup>	0,97±1,26 <sup>ab</sup>	31,62±1,85 <sup>b</sup>	31,69±1,86 <sup>b</sup>	88,59±4,07 <sup>cd</sup>
U40	12,15±1,34 <sup>b</sup>	73,65±2,74 <sup>b</sup>	2,72±1,29 <sup>a</sup>	33,26±1,14 <sup>b</sup>	33,39±1,22 <sup>b</sup>	85,38±2,09 <sup>d</sup>

Médias de mesma letra na coluna, não diferem significativamente entre si ( $p < 0,05$ ) pelo teste de Tukey.

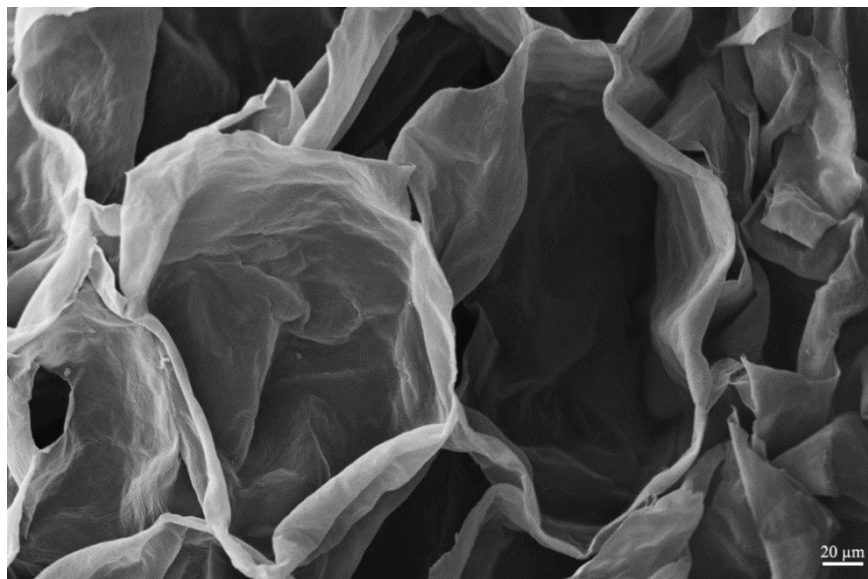
Fonte: Da autora (2018)

### 3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para observar as alterações estruturais causadas pela influência do uso de ultrassom no tecido de maçã, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Esta técnica permite uma melhor compreensão das modificações trazidas pelo processo de imersão em água. Assim, imagens das amostras frescas e daquelas que passaram 40 minutos em água destilada, com ou não aplicação de ultrassom foram avaliadas. Como o MEV da amostra de maçã não tratado mostra (Figura 2), o tecido da fruta exibia células inchadas com paredes celulares definidas e organizadas. Quando comparado ao tecido de maçã não tratado (Figura 2), a imersão em água e a aplicação de ondas ultrassônicas causaram severos danos estruturais ao fruto (Figuras 3 (c) – (d)). Tais alterações foram devidas a imersão em água durante a aplicação das ondas de ultrassom, que aceleram e facilitam a transferência de massa, levando a intensa alteração na estrutura celular. Resultados semelhantes foram relatados em tomate (CORRÊA et al., 2015), maçã (NOWACKA et al., 2012), kiwi (NOWACKA et al., 2014). Durante a aplicação de ultrassom, as micrografias mostraram a distorção das paredes celulares e o colapso da estrutura celular das amostras de maçã (Figuras 3 (c) - (d)). Para efeito de comparação, foi realizado o MEV no tratamento de 40 minutos em água destilada (Figuras 3 (a) - (b)), onde se pode verificar que a secagem modificou as células da maçã, porém não ocorreram os efeitos de danificação das mesmas como ocorreu no tratamento com ultrassom (Figuras 3 (c) - (d)). Esse fenômeno pode acontecer devido ao processo de formação de microcanais durante a aplicação do ultrassom e a água poderia utilizar os canais microscópicos como um caminho mais fácil de

difundir em direção à superfície do fruto. FERNANDES; GALLA; RODRIGUES, (2008), verificaram em imagens microscópicas que os microcanais eram formados pelo alongamento das células em algumas regiões dos melões submetidos ao tratamento de ultrassom, e que nenhuma quebra celular foi observada nas amostras. Esses efeitos podem ser explicados pelo fenômeno da cavitação (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; CÁRCEL; BENEDITO; MULET, 2012; CORRÊA et al., 2015).

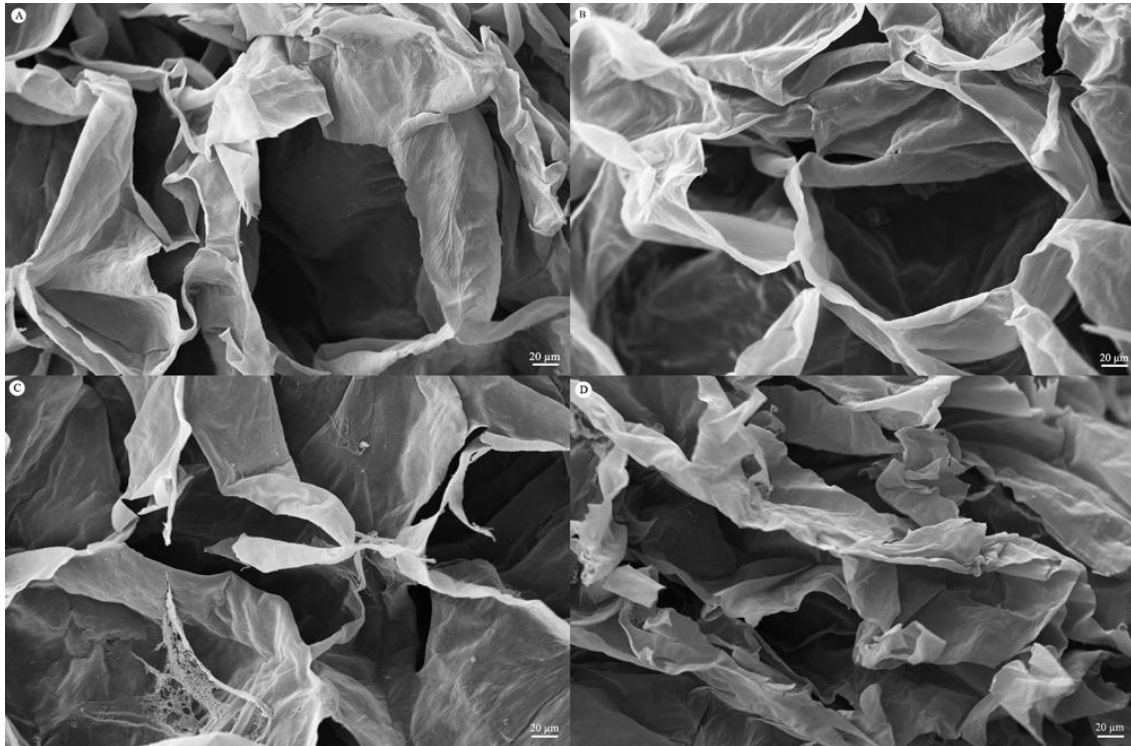
Figura 2: Fotografia de fatia de maçã feita utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (A - Maçã fresca 600x).



Fonte: Da autora (2018).



Figura 3: Fotografias de fatias de maçã feitas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (A - água 40 minutos aumento 600x, B - água 40 minutos após secagem aumento 600x, C - ultrassom 40 minutos aumento 600x, D - ultrassom 40 minutos após secagem 600x).



Fonte: Da autora (2018).

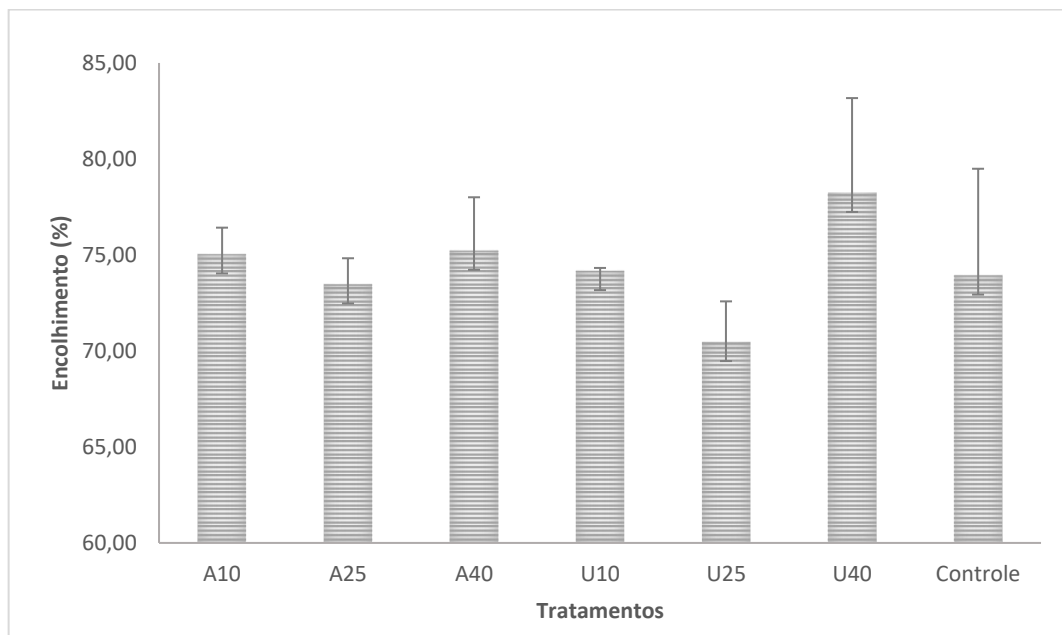
### 3.2.4 Encolhimento e capacidade de reidratação

Os testes de encolhimento mostram o quanto uma matriz encolhe após a secagem. Os dados apresentados na figura 4, mostram uma diferença significativa nos testes de Tukey ( $p < 0,05$ ). Os tratamentos que ficaram mais tempo expostos a imersão em água (A40) e pré-tratamento com imersão em água e ultrassom (U40) foram os que tiveram um maior encolhimento.

O encolhimento tem relação com a capacidade de reidratação de um fruto seco, matrizes que possuem um maior encolhimento apresentam uma menor capacidade de reidratação (MAYOR; SERENO, 2004), porém analisando esses dois parâmetros juntos, conclui-se que os tratamentos onde o encolhimento apresentou as maiores taxas tiveram também uma boa capacidade de reidratação (A40 e U40).

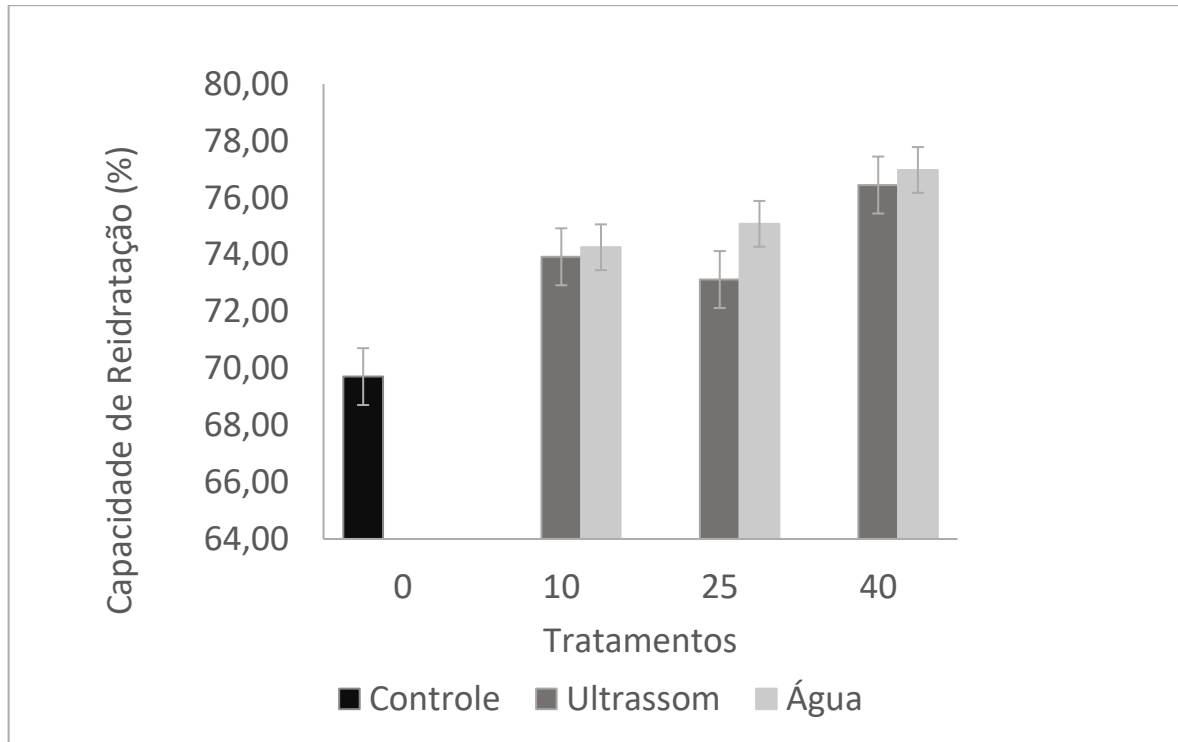
A secagem aumenta a vida útil do produto, porém ela causa mudanças irreversíveis na estrutura do material, como se pode ver nas imagens de microscopia. A capacidade de reidratação é um dos mais importantes índices de qualidade, após a secagem o alimento tem a sua capacidade de absorção de água reduzida (WITROWA-RAJCHERT; RZACA, 2009). Alimentos mais porosos ocasionam uma maior capacidade de reidratação (ARAL; BESE, 2016). A capacidade de reidratação (figura 5) se mostrou melhor nos tratamentos onde o fruto ficou imerso por mais tempo na água, diferente do que foi encontrado por NOWACKA et al. (2012), onde os tratamentos com uso do ultrassom apresentaram uma pior capacidade de reidratação do que o sem tratamento.

Figura 4: Histograma com dados de encolhimento de fatias de maçã em função do tipo de tratamento após a secagem.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 5: Histograma da capacidade de reidratação (%) de fatias de maçã em função do tipo de tratamento após a secagem.



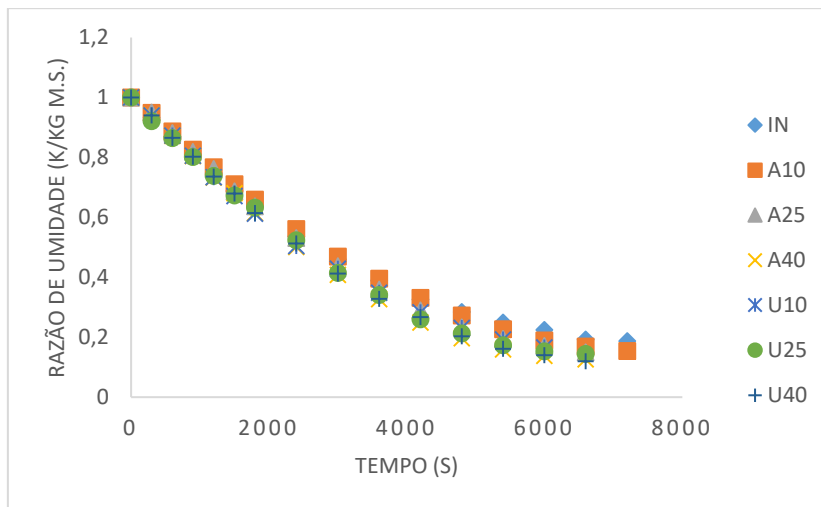
Fonte: Da autora (2018)

### 3.3 Secagem convectiva

A figura 6 mostra as curvas de secagem dos sete tratamentos (IN (Controle), A10, A25, A40, U10, U25, U40) de maçã durante a secagem convectiva. Para fim de comparação, a figura 6 mostra os tratamentos no teor de água de 13%. As amostras que receberam pré-tratamento com água tiveram suas secagens variando entre 98 a 111 minutos, pode-se ver pela figura 7, que nesse teor de água os tratamentos U10 e U25 que tiveram como pré-tratamento imersão em água com uso de ultrassom chegaram em 13% em um tempo menor do que os demais e esse tempo foi de 9 e 8 minutos, respectivamente em relação ao tempo do controle. Esse valor representa uma secagem de aproximadamente 9% mais rápida. Estudos mostram que frutos que passam por pré-tratamentos antes da secagem convectiva podem melhorar a qualidade do produto final, devido ao menor tempo de exposição no secador, pois eles diminuem significativamente o tempo de secagem em comparação aos frutos que seguiram diretamente para o secador (ROJAS; AUGUSTO, 2018; JUNQUEIRA et al., 2017; NOWACKA et al., 2012; AZOUBEL et al., 2010.). Da mesma forma, o tratamento com ultra-ssom reduziu o tempo de

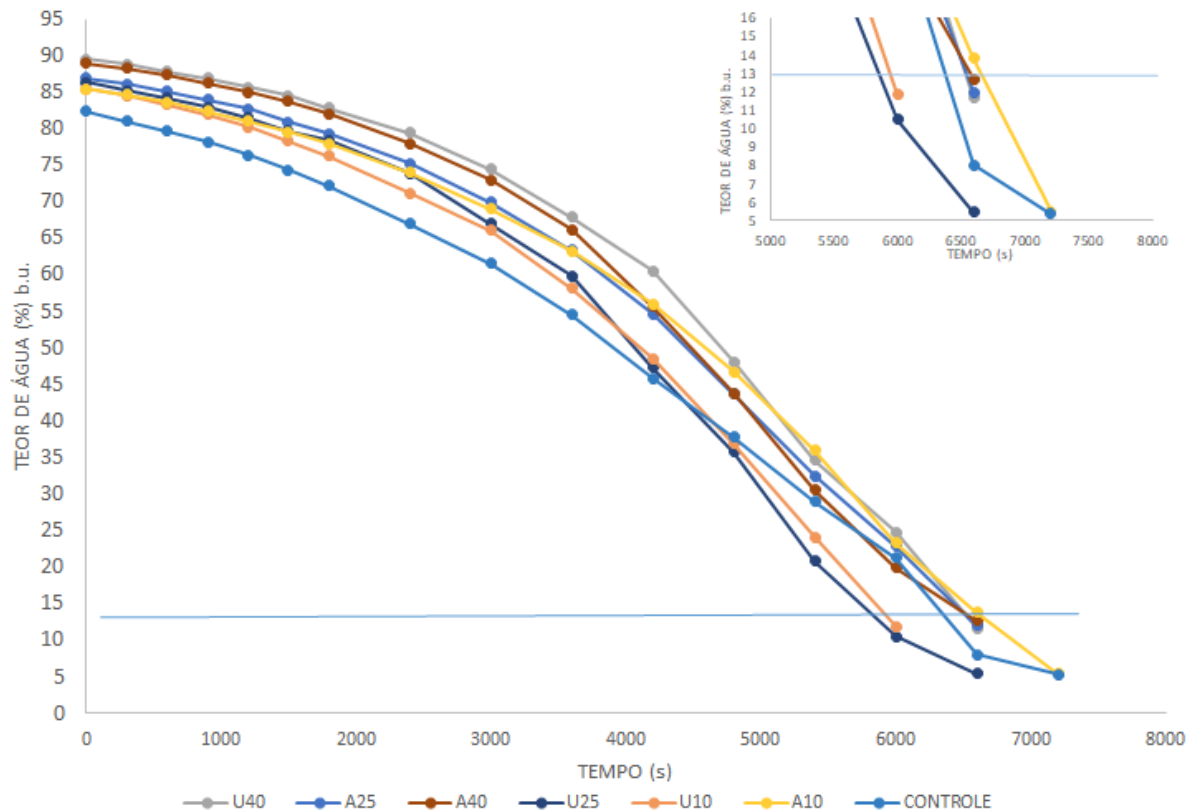
secagem em pesquisas realizadas com maçã em 31 a 40% (NOWACKA et al., 2012). Assim, o tempo de processamento pode ser otimizado para reduzir o tempo de secagem ao mínimo, reduzindo custos da secagem e aumentando a produtividade geral, como observado por (FERNANDES, 2007).

Figura 6: Curvas de secagem, Razão de umidade (Kg/Kg m.s.) x Tempo (s). Tratamentos: IN, A10, A25, A40, U10, U25, U40.



Fonte: Da autora (2018)

Figura 7: Curvas de secagem, Umidade x Tempo (s). Tratamentos: Controle, A10, A25, A40, U10, U25, U40.



Fonte: Da autora (2018)

Tabela 7: Dados de teores de água iniciais e finais dos experimentos de secagem em 13% de teor de água (b.u).

Tratamento	Umidade		Tempo de secagem com 13% de teor de água
	Inicial	Desvio	
<b>Controle</b>	85,022	± 0,519	107
<b>A10</b>	86,499	± 0,866	111
<b>A25</b>	87,583	± 0,997	109
<b>A40</b>	88,705	± 0,769	109
<b>U10</b>	86,525	± 0,244	99
<b>U25</b>	88,373	± 0,142	98
<b>U40</b>	90,095	± 0,214	109

Fonte: Da autora (2018).

### 3.4 Cinética de secagem – modelagem matemática

Observou-se que, para a temperatura de 70 °C utilizada na secagem das fatias de maçãs, a maioria dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 99%, fato que, indica representação satisfatória destes modelos ao fenômeno de secagem estudado (MADAMBÁ, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, 1996). Entretanto, a utilização do coeficiente de determinação como único critério de avaliação para a seleção dos modelos de secagem não constitui um bom parâmetro, sendo necessária a análise conjunta de outros parâmetros estatísticos (MOHAPATRA; RAO, 2005). De acordo com KAUSHAL & SHARMA (2014), valores de SE (%) menores que 5%, indicam um excelente ajuste de equação, enquanto valores maiores que 10 são indicativos de um ajuste inadequado. A melhor equação foi selecionada com base nos maiores valores de  $R^2$  e menores de erro médio relativo (P %). Para a equação selecionada, os valores de  $R^2$  estavam acima de 0,998. Os valores do RMSE variaram de 0,001 a 0,022. Entre as equações de secagem de camada fina testadas, esses valores justificam a escolha do modelo de Henderson & Pabis modificado (tabela 8) e Page (tabela 9). Os modelos de Henderson & Pabis modificado e Page, forneceram as melhores aproximações matemáticas das curvas de secagem experimentais. O modelo de Henderson & Pabis modificado, pode ser escolhido devido ao seu modelo de três parâmetros exponenciais, comportamento semelhante foi verificado em Blueberry (VEGA-GÁLVEZ et al., 2011). As figuras 8 e 9, compara os dados experimentais com os previstos pela equação de Henderson & Pabis modificado e Page, nessa ordem. A tabela 9 apresenta os valores para o modelo de Page. O modelo de Page foi escolhido devido a sua simplicidade e bom ajuste dos dados, apresentando um bom ajuste. RICCE et al. (2016) encontrou um comportamento semelhante em cenouras, onde também foi utilizada a modelagem de Page entre outras, devida ao seu bom ajuste.

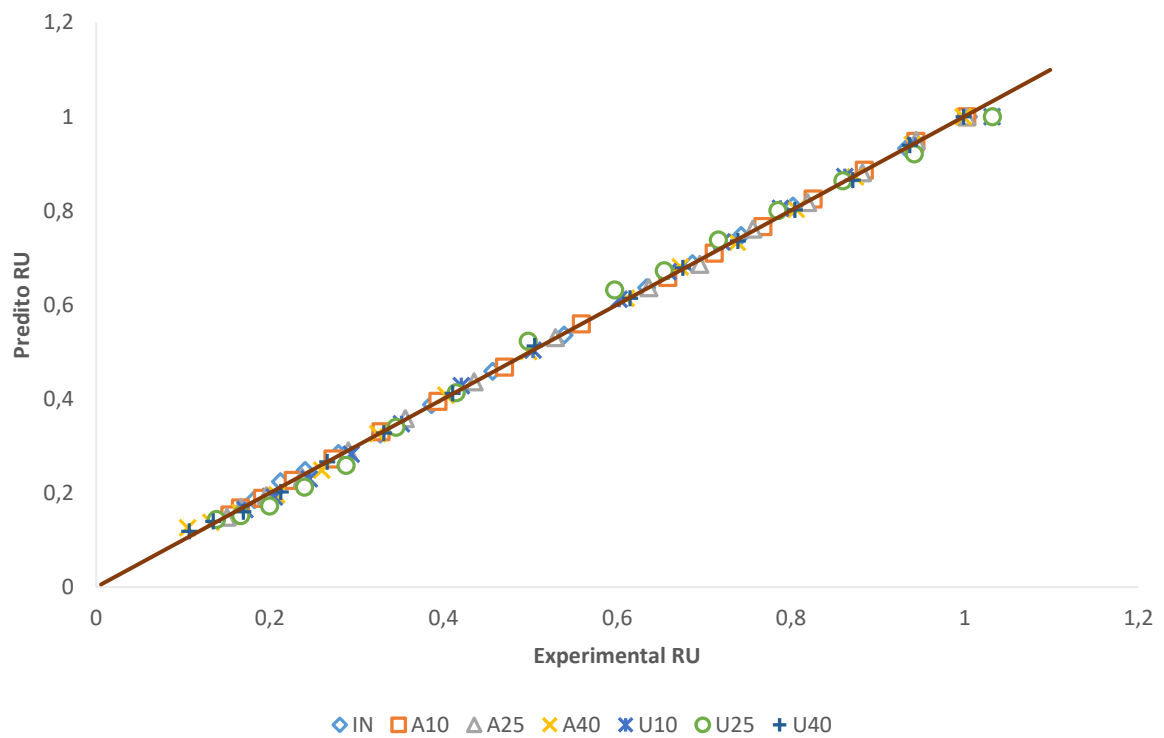
Observou-se boa concordância entre os valores experimentais e preditos de Razão de Umidade (RU). Os pontos de dados geralmente são agrupados em torno de uma linha reta com 45°, suportando a adequação desta equação para descrever o comportamento de secagem de fatias de maçã.

Tabela 8: Valores de P, SE,  $X^2$ , RMSE, R e  $R^2$  para o modelo de Henderson e Pabis modificado.

	IN (Controle)	A10	A25	A40	U10	U25	U40
<b>P</b>	1,13	0,39	0,69	2,74	2,63	5,25	1,97
<b>SE</b>	0,02	0,01	0,01	0,05	0,03	0,07	0,03
<b><math>X^2</math></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RMSE</b>	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b><math>R^2</math></b>	99,98	100,00	99,90	99,93	99,77	99,45	99,96

Fonte: Da autora (2018)

Figura 8: Comparação dos valores experimentais da razão de umidade (RU) experimental e prevista de acordo com equação de Henderson &amp; Pabis modificado.



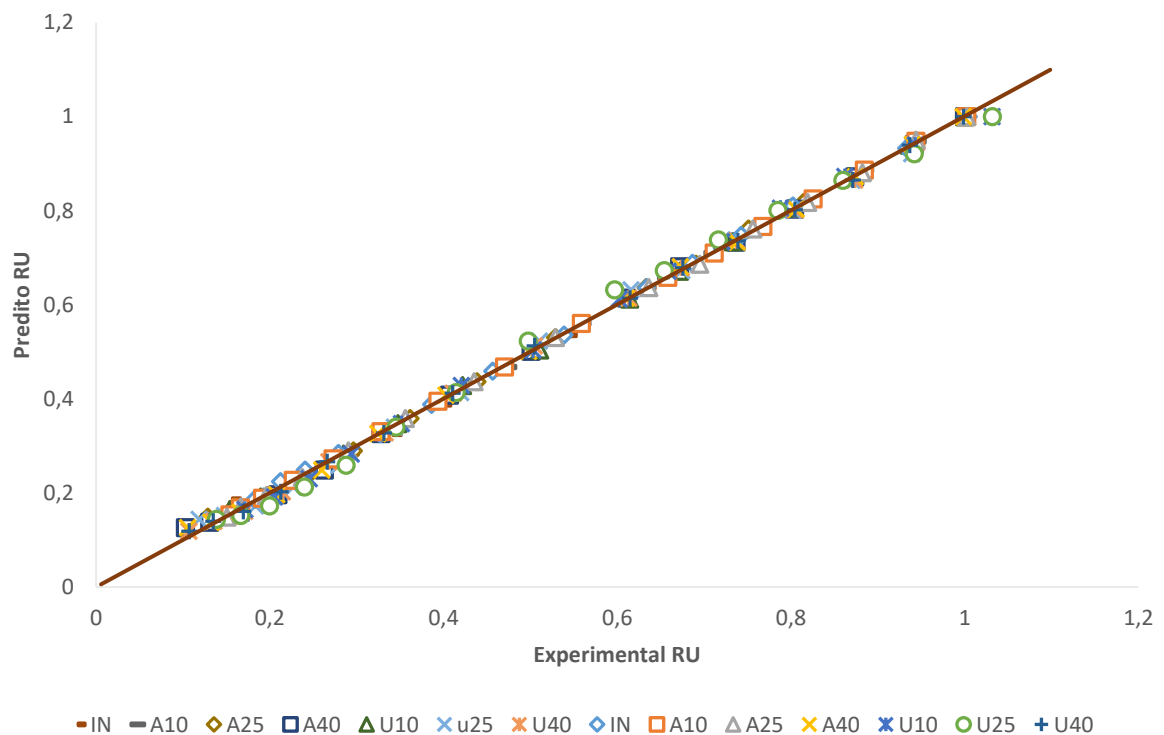
Fonte: Da autora (2018)

Tabela 9: Valores de P, SE, X2, RMSE, R e R2 para o modelo de Page.

	IN						
	(Controle)	A10	A25	A40	U10	U25	U40
<b>P</b>	2,75	1,93	2,16	2,95	1,05	3,53	2,12
<b>SE</b>	0,05	0,04	0,04	0,06	0,02	0,06	0,04
<b>X<sup>2</sup></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>RMSE</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,84	99,95	99,93	99,92	99,97	99,82	99,95

Fonte: Da autora (2018)

Figura 9: Comparação dos valores experimentais da razão de umidade (RU) experimental e prevista de acordo com equação de Page.



Fonte: Da autora (2018)

#### 4 Conclusão

- A imersão de fatias de maçã em água levou a um ganho de água que foi maior com o uso do ultrassom.



- Com relação ao tempo de secagem, ela teve seu tempo reduzido em até 9% quando ocorreu pré-tratamento com ultrassom.
- Analisando os tratamentos de imersão em água sem uso de ultrassom comparado com o controle, não é vantajoso os pré-tratamentos.
- Por outro lado, comparando a imersão em água com uso de ultrassom com o controle é vantajoso o uso do pré-tratamento, nos tempos de 25 e 10 minutos.
- Os pré-tratamentos melhoraram os parâmetros de qualidade da maçã, como a capacidade de reidratação, um parâmetro muito importante após a secagem.
- A maçã que passou por pré-tratamentos com água e ultrassom manteve a sua cor, não causando impactos negativos quanto a este quesito. Observa-se uma qualidade positiva que necessita de mais estudos futuros.
- A equação empírica de Henderson & Pabis modificado e a de Page foram consideradas os melhores modelos para explicar as características de secagem de fatias de maçã, devido aos seus bons ajustes e simplicidade, além de fornecerem coeficientes de determinação mais altos ( $R^2$ ) e menores valores de erro médio relativo (P).

## **5 Agradecimentos**

Os autores agradecem as empresas de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

## 6 Referências

AFONSO JÚNIOR, P.C. & CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 031, p. 349–353, 1999.

AOAC, I. **Official methods of analysis of AOAC International**. [s.l.] 2010, 2010.

ARAL, S.; BESE, 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.

AZOUBEL, P. M. et al. Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 194–198, 2010.

AZOUBEL, P. M. et al. Improvement of Water Transport and Carotenoid Retention During Drying of Papaya by Applying Ultrasonic Osmotic Pretreatment. **Food Engineering Reviews**, v. 7, n. 2, p. 185–192, 2015.

CÁRCEL, J. A.; BENEDITO, J.; MULET, A. Food process innovation through new technologies : Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p. 200–207, 2012.

COLESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. Empresa Br ed. Planaltina, DF: 2010, [s.d.].

CORRÊA FILHO, L. C. et al. Post-harvest of parsley leaves ( *Petroselinum crispum* ): Mathematical modelling of drying and sorption processes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7232, p. 131–136, 2018.

CORRÊA, J. L. G. et al. Osmotic dehydration of tomato assisted by ultrasound: evaluation of the liquid media on mass transfer and product quality. **International Journal of Food Engineering**, v. 11, n. 4, p. 505–516, 2015.

CORRÊA, J. L. G. et al. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 41, n. April, p. 284–291, 2017.

DOYMAZ, I.; SMALL, O. Drying characteristics of sweet cherry. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, n. 1, p. 31–38, 2011.

FERNANDES, F. A. N. et al. Ultrasound-Assisted Air-Drying of Apple ( *Malus domestica* L .) and Its Effects on the Vitamin of the Dried Product. **Food Bioprocess Technol**, 2015.

FERNANDES, F. A. N.; GALLA, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure : Melon dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, p. 604–610, 2008.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 186–190, 2009.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits : Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 261–267, 2007.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of Ultrasound and Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration in Drying of Fruits. **Drying Technology**, v. 26, n. October, p. 37–41, 2008.

FIORRAVANÇO, J. C.; SANTOS, R. S. S. **Maçã. O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Empresa Br ed. Brasília, DF: 2013, 2013.

- FUENTE-BLANCO, S. DE et al. Food drying process by power ultrasound. **Science Direct**, v. 44, p. 523–527, 2006.
- GARCIA-NOGUERA, J. et al. Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration of Strawberries: Effect of Pretreatment Time and Ultrasonic Frequency. **Drying Technology**, v. 28, n. 2, p. 294–303, 2010.
- GUIMARÃES, J. P. et al. Fine Structure of the Dorsal Surface of Ostrich ' s ( *Struthio camelus* ) Tongue Fine Structure of the Dorsal Surface of Ostrich ' s ( *Struthio camelus* ) Tongue. **Bio One Research Evolved**, v. 26, n. 2, p. 153–156, 2009.
- HASSAN-BEYGI, S. R. et al. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. **International Agrophysics**, v. 23, n. 2, p. 129–135, 2009.
- JANOWICZ, M.; LENART, A. LWT - Food Science and Technology Selected physical properties of convection dried apples after HHP treatment. **LWT - Food Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 828–836, 2015.
- 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**, n. December 2015, p. 1–8, 2017.
- JUNQUEIRA, J. R. DE J. et al. Convective drying of cape gooseberry fruits : Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, v. 82, n. April, p. 404–410, 2017.
- KAUSHAL, P.; SHARMA, H. K. Osmo-convective dehydration kinetics of jackfruit ( *Artocarpus heterophyllus* ). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 2014.
- LEWICKI, P. P.; VU LE, H.; POMARAŃSKA-ŁAZUKA, W. Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 54, n. 2, p. 141–146, 2002.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K. A. . The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75–97, 1996.
- MAGALHÃES, M. L. et al. Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, v. 215, p. 72–77, 2017.
- MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 3, p. 373–386, 2004.
- MENDONÇA, K. et al. Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi ( *Caryocar brasiliense* Camb .) slices. **Food Chemistry**, v. 224, p. 212–218, 2016.
- MOHAPATRA, D. & RAO, P. . A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513–518, 2005.
- NAHIMANA, H.; MUJUMDAR, A. S.; ZHANG, M. Drying and radial shrinkage characteristics and changes in color and shape of carrot tissues ( *Daucus carota* L ) during air drying. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 68, p. 15327–15345, 2011.
- NOWACKA, M. et al. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. **Journal of Food Engineering**, v. 113, p. 427–433, 2012.
- NOWACKA, M. et al. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. **Food Chemistry**, v. 144, p. 18–25, 2014.
- OCDE-FAO. OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas Perspectivas Agrícolas no Brasil : desafios da agricultura brasileira. 2015.

- ORIKASA, T. et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **JOURNAL OF FOOD ENGINEERING**, v. 125, p. 51–58, 2014.
- RICCE, C. et al. Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, v. 89, p. 701–708, 2016.
- ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol and ultrasound pre-treatments to improve infrared drying of potato slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 49, n. April, p. 65–75, 2018.
- SAGRIN, M. S.; CHONG, G. H. Effects of drying temperature on the chemical and physical properties of *Musa acuminata* Colla ( AAA Group ) leaves. **Industrial Crops & Products**, v. 45, p. 430–434, 2013.
- SIMAL, S. et al. Use of Ultrasound to Increase Mass Transport Rates During Osmotic Dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 8774, n. 98, p. 323–336, 1998.
- VEGA-GÁLVEZ, A. et al. Effect of Selected Pretreatments on Convective Drying Process of Blueberries ( var . O ' neil ). **Food Bioprocess Technol**, 2011.
- WITROWA-RAJCHERT, D.; RZACA, M. Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. **Drying Technology**, v. 27, n. 7, p. 903–909, 2009.
- XIAO, H.-W. et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 33, n. 2010, p. 899–918, 2008.
- YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. September, p. 1–20, 2012.

### 3. CONCLUSÃO GERAL

- A imersão de fatias de maçã em água levou a um ganho de água que foi maior com o uso do ultrassom.
- Com relação ao tempo de secagem, ela teve seu tempo reduzido em até 9% quando ocorreu pré-tratamento com ultrassom.
- Analisando os tratamentos de imersão em água sem uso de ultrassom comparado com o controle, não é vantajoso os pré-tratamentos.
- Por outro lado, comparando a imersão em água com uso de ultrassom com o controle é vantajoso o uso do pré-tratamento, nos tempos de 25 e 10 minutos.
- Os pré-tratamentos melhoraram os parâmetros de qualidade da maçã, como a capacidade de reidratação, um parâmetro muito importante após a secagem.
- A maçã que passou por pré-tratamentos com água e ultrassom manteve a sua cor, não causando impactos negativos quanto a este quesito. Observa-se uma qualidade positiva que necessita de mais estudos futuros.
- A equação empírica de Henderson & Pabis modificado e a de Page foram consideradas os melhores modelos para explicar as características de secagem de fatias de maçã, devido aos seus bons ajustes e simplicidade, além de fornecerem coeficientes de determinação mais altos ( $R^2$ ) e menores valores de erro médio relativo (P).

## APÊNDICE

## Resultados Modelagem Matemática

IN											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	2,72	2,75	2,72	2,66	1,98	1,23	2,72	100,11	1,13	62,66	2,59
<b>SE</b>	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,04	1,71	0,02	0,78	0,05
<b>X<sup>2</sup></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91	0,00	0,61	0,00
<b>RMSE</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,36	0,00	0,25	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,83	99,84	99,83	99,85	99,89	99,94	99,83	99,95	99,98	83,36	99,86

A10											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	4,82	1,93	4,86	3,09	3,03	3,09	4,58	95,77	0,39	17,67	2,43
<b>SE</b>	0,06	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04	0,06	1,68	0,01	0,32	0,03
<b>X<sup>2</sup></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,83	0,00	0,10	0,00
<b>RMSE</b>	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,30	0,00	0,07	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,45	99,95	99,45	99,73	99,85	99,73	99,45	99,96	100,00	94,93	99,87

A25											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	6,00	2,16	6,00	3,67	3,52	1,75	6,20	92,21	0,69	121,71	1,75
<b>SE</b>	0,08	0,04	0,08	0,05	0,05	0,03	0,08	1,64	0,01	1,74	0,03
<b>X<sup>2</sup></b>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	2,70	0,00	3,03	0,00
<b>RMSE</b>	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,29	0,00	0,38	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,19	99,93	99,19	99,60	99,78	99,96	99,15	99,89	99,90	99,98	99,96

A40											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	8,27	2,95	8,19	5,49	5,00	5,49	8,11	122,52	2,74	27,91	2,72
<b>SE</b>	0,11	0,06	0,11	0,08	0,08	0,08	0,11	2,20	0,05	0,41	0,05
<b>X<sup>2</sup></b>	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	4,85	0,00	0,17	0,00
<b>RMSE</b>	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,32	0,01	0,14	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,93	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,00	99,92	99,00	99,44	99,71	99,44	99,00	99,90	99,93	86,25	99,93

U10											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	4,22	1,05	4,24	2,63	1,80	2,63	4,49	76,75	2,63	26,31	0,84
<b>SE</b>	0,05	0,02	0,06	0,03	0,03	0,03	0,06	1,37	0,03	0,32	0,01
<b>X<sup>2</sup></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,89	0,00	0,10	0,00
<b>RMSE</b>	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,27	0,01	0,13	0,00
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,51	99,97	99,51	99,77	99,90	99,77	99,51	99,95	99,77	79,34	99,98

U25											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	6,48	3,53	6,41	5,25	5,07	3,55	6,29	111,05	5,25	136,06	3,27
<b>SE</b>	0,09	0,06	0,09	0,07	0,08	0,06	0,09	1,96	0,07	1,95	0,06
<b>X<sup>2</sup></b>	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	3,86	0,00	3,80	0,00
<b>RMSE</b>	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,32	0,02	0,40	0,01
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,22	99,82	99,22	99,45	99,67	99,84	99,22	99,91	99,45	99,87	99,85

U40											
<i>Modelos</i>	Newton	Page	Page Modificado	Henderson e Pabis	Logarítico	Dois Termos	Exponencial de Dois Termos	Wang e Sing	Henderson e Pabis Modificado	Midilli et al.	Aproximação da Difusão
<b>P</b>	8,19	2,12	8,26	5,82	4,23	2,00	8,29	119,85	1,97	37,41	4,34
<b>SE</b>	0,11	0,04	0,11	0,08	0,07	0,03	0,11	2,18	0,03	0,64	0,06
<b>X<sup>2</sup></b>	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	4,77	0,00	0,41	0,00
<b>RMSE</b>	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,31	0,01	0,12	0,02
<b>R</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00
<b>R<sup>2</sup></b>	99,11	99,95	99,11	99,49	99,81	99,96	99,11	99,95	99,96	93,27	99,70

Fonte: Da autora (2018)