



FERNANDA REZENDE ABRAHÃO

**OBTENÇÃO DE BANANA (*Musa Sapientum* L., Prata variety)
DESIDRATADA ENRIQUECIDA COM ISOMALTULOSE**

**LAVRAS-MG
2022**

FERNANDA REZENDE ABRAHÃO

**OBTENÇÃO DE BANANA (*Musa Sapientum* L., Prata variety) DESIDRATADA
ENRIQUECIDA COM ISOMALTULOSE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador
Profa. Dra. Renata Nepomuceno da Cunha
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

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

Abrahão, Fernanda Rezende.

Obtenção de banana (*Musa Sapientum* L., Prata variety)
desidratada enriquecida com isomaltulose / Fernanda Rezende
Abrahão. - 2022.

203 p. : il.

Orientador(a): Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Coorientador(a): Renata Nepomuceno da Cunha.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Desidratação osmótica. 2. Dual-Stage Sugar Substitution. 3.
Energia Ultrassônica. I. Corrêa, Jefferson Luiz Gomes. II. da
Cunha, Renata Nepomuceno. III. Título.

FERNANDA REZENDE ABRAHÃO

**OBTENÇÃO DE BANANA (*Musa Sapientum* L., Prata variety) DESIDRATADA
ENRIQUECIDA COM ISOMALTULOSE**

**OBTAINMENT OF DRIED BANANA (*Musa Sapientum* L., Prata variety) ENRICHED
WITH ISOMALTULOSE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 25 de maio de 2022.

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa UFLA

Dra. Renata Nepomuceno da Cunha UNIPAM

Dr. João Renato de Jesus Junqueira UFMS

Dr. Christiano Vieira Pires UFSJ

Dr. Gustavo Cesar Dacanal USP



Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
Orientador

Profa. Dra. Renata Nepomuceno da Cunha
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

Aos meus pais, Edmar e Maria José, pelo apoio e exemplo.

Ao meu irmão Lucas, pelo companheirismo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A obtenção do título de “Doutora” sempre foi um grande sonho meu. No meio da busca por este sonho, algumas adversidades apareceram, dentre elas a batalha contra um câncer durante mais de um ano. A luta não foi fácil e o sentimento de vitória só é completo quando compartilhado com quem amamos e somos gratos. Na finalização dessa e no início de uma nova etapa da minha vida, gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelo acalento espiritual nas horas difíceis. Agradeço também pela minha vida.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Edmar e Maria José, meus alicerces, exemplos a serem seguidos, e que sempre estiveram presentes em todos os momentos. Lutaram incansavelmente ao meu lado em um dos momentos mais pesados da minha vida. Obrigado pelo apoio e carinho. Essa vitória também é de vocês!

Ao meu irmão Lucas, pelo companheirismo, amizade e inúmeras músicas compartilhadas.

À minha grande família, que me mostrou o quanto sou amada e privilegiada. Mostraram-se que sozinha nada se vence e que mesmo longe sempre se podem fazer presentes.

Aos amigos, pelo apoio e amor em todos os momentos dessa difícil caminhada de quase 5 anos de duração. Meu especial agradecimento à Amanda, Lenizy, Renata, Laís, Paula, Ana Paula, Nayane e Jéssica.

Ao Prof. Dr. Jefferson Corrêa pela orientação, paciência, incentivo e ensinamentos constantes. É sempre gratificante trabalhar com profissionais que admiramos e respeitamos. O período sob sua orientação foi de grande aprendizado e amizade.

À Prof. Dra Renata Nepomuceno pela amizade e disponibilidade em ajudar e contribuir com o estudo. Agradeço ao acolhimento, o conhecimento trocado e a feliz convivência diária.

Ao Arley, pela ajuda com as secagens e realização das análises posteriores. Obrigada pela paciência e disposição em ajudar.

À Amanda, Paula, Ítalo, Laís e demais colegas de laboratório pela ajuda com as análises, amizade e risadas durante os dias de trabalho.

Aos demais colegas de pós-graduação, pela convivência e constante conhecimento compartilhado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciências de Alimentos e do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, pelas contribuições e ensinamentos. Agradeço também pela ajuda com as obrigações e tarefas durante meu período de afastamento.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA/UFLA) pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), por disponibilizar os laboratórios e infraestrutura necessária para execução dos experimentos do meu doutorado. Agradeço também aos funcionários e técnicos sempre gentis na ajuda com os testes.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com uma palavra amiga, conselhos e ajuda, meu muito obrigada! Estejam cientes de que cada linha escrita aqui tem uma parte de vocês.

MUITO OBRIGADA!

“We can be heroes, just for one day.”
(David Bowie)

RESUMO GERAL

Diante da importância de processos de desidratação na extensão da vida de prateleira e conservação de alimentos, o presente estudo teve como objetivo a obtenção de bananas da variedade Prata desidratadas, sob condições distintas. Foram avaliados diferentes métodos de incorporação de isomaltulose, um carboidrato de baixo índice glicêmico com importantes propriedades nutricionais. As características físico-químicas das frutas secas obtidas foram analisadas, assim como toda a modelagem matemática dos processos de secagem. No estudo, a incorporação de isomaltulose foi realizada mediante duas técnicas: desidratação osmótica convencional e *Dual-stage Sugar Substitution* (D3S). Em ambas as técnicas foi avaliado se a aplicação de energia ultrassônica e o uso de pré-tratamentos foram eficientes na perda de água e ganho de sólidos pelas fatias de banana. A influência da incorporação de isomaltulose na secagem das fatias de banana também foi avaliada. Dois métodos de secagem foram aplicados: secagem convectiva (temperaturas de 60 e 70 °C) e secagem por infravermelho (temperatura de 70 °C). A incorporação de isomaltulose por meio da técnica de D3S em bananas da variedade Prata imaturas também foi realizada, avaliando suas características físico-químicas finais e cinética de desidratação, visando à produção de um alimento com importantes propriedades nutricionais. Todas as equações empíricas aplicadas na modelagem matemática das cinéticas de secagem apresentaram ótimo ajuste ($R^2 > 0.999$), destacando-se o modelo de Midilli. De maneira geral, o uso de energia ultrassônica como tratamento prévio à secagem convectiva e secagem por infravermelho de fatias de bananas resultou em redução do tempo de secagem de até 29%, apresentando maiores valores de difusividade efetiva de água, além de proporcionar menor encolhimento tanto radial como longitudinal. A imersão das amostras em água previamente à secagem convectiva mostrou-se um eficiente tratamento, reduzindo tempos de secagem, apresentando menor consumo energético ($107.57 \text{ kWh.kg}^{-1}$), além de proporcionar amostras com melhor capacidade de reidratação. A desidratação osmótica proporcionou a produção de fatias de banana incorporadas de isomaltulose, porém não foi efetiva na redução de tempos e parâmetros de cinética de secagem. Entretanto, o tratamento resultou em cores intensas, melhor aspecto físico e melhor capacidade de reidratação em alguns casos. O uso da técnica de D3S mostrou-se eficiente na incorporação de isomaltulose em fatias de banana. A associação de ultrassom (40 kHz) em ambos os estágios da técnica promoveu maior perda de água (10.0%) e maior incorporação de soluto (4.8%). Entretanto, amostras tratadas pela técnica D3S demandaram maiores tempos de secagem convectiva (até 370 minutos).

Palavras-chave: Ganho de sólidos. Perda de água. Difusividade de água. Energia ultrassônica. Desidratação osmótica. *Dual-Stage Sugar Substitution*.

GENERAL ABSTRACT

Given the importance of dehydration processes in the extension of shelf life and food conservation, the present study aimed to obtain dried bananas, under different conditions. Different methods of isomaltulose incorporation, a low glycemic index carbohydrate with important nutritional properties, were evaluated. The physical-chemical characteristics of the dried bananas were evaluated as well as all the mathematical modeling of the drying processes. In the study, the incorporation of isomaltulose was performed using two techniques: conventional osmotic dehydration and dual-stage sugar substitution (D3S). In both techniques, it was evaluated whether the application of ultrasonic energy and the use of pre-treatments were efficient in the loss of water and gain of solids by the banana slices. The influence of isomaltulose incorporation on the drying of banana slices was also evaluated. Two drying methods were applied: heated air drying (temperatures of 60 and 70 °C) and infrared drying (temperature of 70 °C). The incorporation of isomaltulose using the D3S technique in immature Prata bananas was also carried out, evaluating their final physicochemical characteristics and dehydration kinetics, aiming at the production of a food with important nutritional properties. All the empirical equations applied in the mathematical modeling of the drying kinetics showed excellent fit ($R^2 > 0.999$), highlighting the Midilli model. In general, the use of ultrasonic energy as a pre-treatment to heated air drying and infrared drying of banana slices resulted in a drying time reduction of up to 29%, presenting higher values of effective water diffusivity, in addition to providing less shrinkage both radial and longitudinal. The immersion of samples in water prior to heated air drying proved to be an efficient treatment, reducing drying times, presenting lower energy consumption ($107.57 \text{ kWh.kg}^{-1}$) in addition to providing samples with better rehydration capacity. Osmotic dehydration provided the production of isomaltulose-incorporated banana slices, but was not effective in reducing drying times and kinetics parameters. However, the treatment resulted in intense colors, better physical appearance and better rehydration capacity in some cases. The use of the D3S technique proved to be efficient in the incorporation of isomaltulose in banana slices. The association of ultrasound (40 kHz) in both stages of the technique promoted greater water loss (10.0%) and greater solute incorporation (4.8%). However, samples treated by the D3S technique required longer drying times (about 370 min).

Keywords: Solid gain. Water loss. Water diffusivity. Ultrasonic energy. Osmotic dehydration. Dual-stage sugar substitution.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

| | |
|--|----|
| Figura 1- Banana da variedade Prata..... | 24 |
| Figura 2- Fluxos de transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica | 25 |
| Figura 3- Estrutura química da palatinose..... | 33 |
| Figura 4 - Variação de umidade de um alimento durante o processo de secagem | 37 |

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma dos tratamentos aplicados no estudo | 60 |
| Figura 2 - Fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem simultaneamente durante a secagem convectiva de fatias de banana | 64 |
| Figura 3 - Bananas secas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) sob diferentes condições de estudo | 70 |
| Figura 4 - Tempo médio de secagem para atingir 25% de umidade (base úmida) de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos..... | 71 |
| Figura 5 - Evolução do teor de umidade durante a secagem convectiva de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) a 60°C (A) e 70°C (B) com e sem a aplicação de pré-tratamentos | 73 |
| Figura 6 - Comparação dos valores de razão de umidade (MR) experimental e predito de acordo com a equação de Midilli para a secagem de fatias de banana (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) a 60°C (A) e 70°C (B)..... | 74 |
| Figura 7 - Cinética de reidratação de fatias de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) a 60°C (A) e 70°C (B) com e sem a aplicação de pré-tratamentos..... | 86 |

ARTIGO 2

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Design experimental utilizado no estudo de secagem de fatias de banana por infravermelho | 100 |
| Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem por infravermelho de fatias de banana submetidas a diferentes pré-tratamentos | 110 |
| Figura 3 - Tempo médio de secagem para atingir 25% de umidade (base úmida) de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4 - Taxa de secagem de fatias de banana pré-tratadas em função do seu teor de umidade..... | 112 |
| Figura 5 - Capacidade de reidratação das fatias de banana secas por infravermelho submetidas a diferentes pré-tratamentos | 122 |

ARTIGO 3

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Fluxograma de etapas da técnica de D3S aplicada em fatias de banana | 141 |
| Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem de fatias de banana submetidas a diferentes condições de D3S | 150 |
| Figura 3 - Bananas secas pré-tratadas sob diferentes condições da técnica de D3S | 157 |
| Figura 4 - Cinética de reidratação de fatias de bananas secas submetidas previamente a diferentes condições da técnica de D3S | 159 |

ARTIGO 4

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Fluxograma de etapas da técnica de D3S aplicada em fatias de banana imaturas. | 173 |
| Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem de fatias de banana verde submetidas a diferentes condições de D3S | 182 |
| Figura 3 - Comparação dos valores de razão de umidade (MR) experimental e preditos de acordo com a equação de Midilli para a secagem de fatias de banana verde pré-tratadas pela técnica de D3S | 184 |
| Figura 4 - Coeficientes de encolhimento volumétrico de fatias de banana verde incorporadas de isomaltulose pela técnica de D3S | 188 |
| Figura 5 - Bananas imaturas secas pré-tratadas sob diferentes condições da técnica de D3S. | 190 |
| Figura 6 - Cinética de reidratação de fatias de banana verde secas submetidas previamente a diferentes condições da técnica de D3S | 192 |

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Estudos da aplicação da desidratação osmótica em diferentes variedades de bananas (Continua)..... | 28 |
| Tabela 2 - Equações empíricas aplicadas às curvas de secagem..... | 39 |

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Caracterização da banana Prata (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) fresca..... | 59 |
| Tabela 2 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada..... | 63 |
| Tabela 3- Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação de pré-tratamentos..... | 69 |
| Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) (Continua)..... | 74 |
| Tabela 5 - Parâmetros de ajuste das equações (Eq. 7 e Eq. 8) de dependência linear entre o encolhimento volumétrico e o teor de umidade na secagem convectiva de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) sob diferentes condições..... | 77 |
| Tabela 6 - Coeficientes de difusividade efetiva de umidade (D_{eff}) das amostras..... | 77 |
| Tabela 7 - Consumo energético estimado do processo de secagem convectiva de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos ... | 80 |
| Tabela 8 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos..... | 81 |
| Tabela 9 - Teor de umidade final (X_f), atividade de água (a_w), pH e acidez titulável de fatias de bananas (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) secas..... | 83 |
| Tabela 10 - Parâmetros de cor de fatias de banana (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) secas sob diferentes condições..... | 85 |

ARTIGO 2

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Delineamento experimental dos pré-tratamentos aplicados no estudo..... | 102 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| Tabela 2 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada..... | 104 |
| Tabela 3 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação de pré-tratamentos..... | 109 |
| Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana, sem tratamento (Controle) e submetidas aos pré-tratamentos US 20, US 30, OD 60, USOD 20, USOD 30 e USOD 40 (Continua). | 113 |
| Tabela 5 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras secas | 115 |
| Tabela 6 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas por infravermelho..... | 117 |
| Tabela 7- Teor de umidade final (em base seca), atividade de água (a_w) e parâmetros de cor de fatias de banana secas por infravermelho | 119 |

ARTIGO 3

| | |
|--|-----|
| Tabela 1- Caracterização da banana Prata (<i>Musa Sapientum</i> L., Prata variety) fresca..... | 142 |
| Tabela 2 - Delineamento experimental aplicado no estudo de <i>Dual-Stage Sugar Substitution</i> (D3S) | 142 |
| Tabela 3 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada | 145 |
| Tabela 4 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação das etapas da técnica de D3S..... | 149 |
| Tabela 5 - Tempo médio de secagem e teor de umidade (X) das fatias de banana submetidas a diferentes condições de D3S e posterior secagem convectiva | 151 |
| Tabela 6 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Continua). | 152 |
| Tabela 7 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras..... | 154 |
| Tabela 8 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas | 155 |
| Tabela 9 - Caracterização físico-química de fatias de bananas secas submetidas a diferentes condições da técnica de D3S como pré-tratamento | 158 |

ARTIGO 4

| | |
|---|-----|
| Tabela 1- Delineamento experimental aplicado no estudo..... | 174 |
|---|-----|

| | |
|---|-----|
| Tabela 2- Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada | 176 |
| Tabela 3 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação das etapas da técnica de D3S..... | 180 |
| Tabela 4 - Tempo médio de secagem e teor de umidade (X) das fatias de banana verde submetidas a diferentes condições de D3S e posterior secagem convectiva | 182 |
| Tabela 5 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana verde submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Continua). | 185 |
| Tabela 6 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras secas | 186 |
| Tabela 7 - Caracterização físico-química de fatias de banana verde secas submetidas a diferentes condições da técnica de D3S como pré-tratamento. | 191 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| a_w | Atividade de água |
| d.b. | Base seca |
| DR | Taxa de secagem |
| D3S | <i>Dual-stage sugar substitution</i> |
| E_D | Consumo energético durante a secagem |
| E_{US} | Consumo energético do ultrassom |
| IM | Tratamento por imersão em água |
| OD | Desidratação osmótica |
| MR | Razão de umidade |
| R^2 | Coefficiente de correlação |
| RC | Capacidade de reidratação |
| RMSE | Raiz quadrada do erro médio |
| SC | Coefficiente de encolhimento |
| SG | Ganho de sólidos |
| SI | Encolhimento isotrópico |
| SL | Encolhimento longitudinal |
| SR | Encolhimento radial |
| TEC | Total de energia consumido |
| US | Ultrassom |
| USOD | Desidratação osmótica assistida por ultrassom |
| WL | Perda de água |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|---|
| a | Constante empírica |
| a* | Coloração vermelha/Vermelhidão |
| A | Área transversal de secagem [m ²] |
| b | Constante empírica |
| b* | Coloração amarela |
| C _p | Calor específico do ar (25 °C) [kJ/kg × K] |
| C* | Chroma |
| d | Diâmetro [m] |
| D _{eff} | Difusividade efetiva [m ² /s] |
| H° | Ângulo Hue (tonalidade) |
| k | Coefficiente de ajuste |
| l | Espessura [m] |
| L | Comprimento [m] |
| L* | Luminosidade |
| n | Constante de ajuste empírica |
| t | Tempo [s] |
| v | Velocidade do ar de secagem [m/s] |
| V | Volume [m ³] |
| V ₀ | Volume inicial [m ³] |
| W | Potência volumétrica de ultrassom [W/L] |
| w _i | Massa inicial da amostra [kg] |
| x _i | Teor de umidade inicial da amostra em base úmida [kg água/kg amostra] |
| x _{sf} | Teor de sólidos totais [kg sólido/kg amostra] |
| X _t | Teor de umidade em base seca durante o tempo t [kg de água/kg amostra seca] |
| X ₀ | Teor de umidade inicial em base seca [kg de água/kg amostra seca] |
| X _{eq} | Teor de umidade em equilíbrio [kg de água/kg amostra seca] |
| z | Coordenada geral [m] |
| ρ _a | Densidade do ar de secagem [kg/m ³] |
| ΔT | Variação de temperatura [K] |

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|--|------------|
| | PRIMEIRA PARTE | 19 |
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 19 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 21 |
| 2.1 | Produtos com teor de açúcares reduzido | 21 |
| 2.2 | Banana (<i>Musa spp.</i>) | 22 |
| 2.2.1 | Banana Prata (<i>Musa Sapientum L., Prata variety</i>) | 23 |
| 2.3 | Desidratação osmótica | 24 |
| 2.3.1 | Fatores que afetam o tratamento osmótico | 30 |
| 2.3.1.1 | Tempo de imersão | 30 |
| 2.3.1.2 | Temperatura da solução osmótica | 31 |
| 2.3.1.3 | Solução osmótica | 32 |
| 2.4 | Isomaltulose (D-glucopiranosil-1, 6-frutose) | 33 |
| 2.5 | Ultrassom | 35 |
| 2.6 | Secagem convectiva | 36 |
| 2.6.1 | Mecanismos da secagem | 37 |
| 2.6.2 | Modelagem matemática da secagem convectiva | 38 |
| 2.7 | Secagem por infravermelho | 40 |
| | REFERÊNCIAS | 42 |
| | SEGUNDA PARTE | 55 |
| | ARTIGO 1 - INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS NÃO-TÉRMICOS NA SECAGEM CONVECTIVA DE BANANA (<i>Musa Sapientum L., Prata variety</i>): MODELAGEM MATEMÁTICA, CARACTERIZAÇÃO E REIDRATAÇÃO | 55 |
| | ARTIGO 2 - EFEITO DO ULTRASSOM E DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA COMO PRÉ-TRATAMENTOS NA SECAGEM DE FATIAS DE BANANA (<i>Musa Sapientum L., Prata variety</i>) POR INFRAVERMELHO | 96 |
| | ARTIGO 3 - USO DO MÉTODO <i>DUAL-STAGE SUGAR SUBSTITUTION</i> E DE ULTRASSOM PARA A INCORPORAÇÃO DE ISOMALTULOSE EM FATIAS DE BANANA | 137 |

| | |
|--|------------|
| ARTIGO 4 - USO DO MÉTODO <i>DUAL-STAGE SUGAR</i> <i>SUBSTITUTION</i> E DE ULTRASSOM NA INCORPORAÇÃO DE ISOMALTULOSE EM FATIAS DE BANANAS IMATURAS | 169 |
| CONCLUSÕES GERAIS | 203 |

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A banana-prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) é uma fruta de grande cultivo, especialmente em países de clima tropical, representando uma fonte nutricional e de renda para milhões de pessoas. A fruta se caracteriza por ser um alimento rico e com boa digestibilidade, dispondo de um alto teor de carboidratos, potássio e de vitaminas (A, B6 e C), aliado a uma baixa quantidade de lipídios.

Devido à sua composição e propriedades físico-químicas, a banana apresenta grande susceptibilidade a processos deteriorativos logo após a fruta ser colhida, diminuindo sua vida de prateleira. A produção de banana desidratada representa uma opção para a preservação da sua qualidade e valor nutricional.

O método de desidratação osmótica é uma alternativa, principalmente para a redução do teor de água, a fim de minimizar as taxas de reações químicas e facilitar a distribuição e o armazenamento do produto. O método é, na realidade, a combinação dos processos de desidratação e impregnação de solutos, que podem atuar na minimização de alterações indesejáveis no alimento (RAMYA; JAIN, 2017). Diferentes solutos podem ser empregados no processo de desidratação osmótica, como sacarose e xaropes diversos. A isomaltulose, comercialmente conhecida como palatinose, representa um soluto alternativo no processo de desidratação. Está naturalmente presente no mel e na cana-de-açúcar e apresenta sabor e aparência similar à sacarose, sendo um carboidrato de baixo índice glicêmico, conferindo ao produto final benefícios nutricionais (HOLUB *et al.*, 2010).

Atualmente, há a tendência na busca de alimentos que supram necessidades específicas. A incorporação de nutrientes em alimentos é uma alternativa para essa questão, e a associação de tecnologias emergentes pode beneficiar o processo. Dentre as tecnologias mais aplicadas, incluem-se ultrassom (CORRÊA *et al.*, 2017), pulso de vácuo (DE OLIVEIRA *et al.*, 2017) e micro-ondas (CANO-LAMADRID *et al.*, 2017). Outra alternativa, com pouca aplicação observada na literatura ainda, é o processo de substituição de açúcar em dois estágios (D3S). O método visa induzir a substituição dos açúcares nativos por outros de interesse, consistindo-se de uma etapa inicial de imersão do alimento em água e uma posterior de imersão em soluções saturadas.

Porém, tanto o método de D3S quanto o processo de desidratação osmótica em si não são capazes de reduzir significativamente o teor de água de um produto. Faz-se necessária uma

operação unitária complementar para a conservação do alimento, como a secagem. Dentre os métodos de secagem, destacam-se a convectiva e a por infravermelho, os quais apresentam vantagens, como reduzidos custo e tempo de processo, respectivamente (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017; YADAV; SINGH, 2014).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo o processamento e a obtenção de bananas desidratadas, com a incorporação de isomaltulose. Duas técnicas de incorporação de isomaltulose foram aplicadas: a técnica de desidratação osmótica e o D3S, com e sem a assistência de energia ultrassônica. A avaliação da influência dos pré-tratamentos e suas condições na secagem das amostras foi realizada por meio de cinéticas de secagem e modelagem matemática. As características físico-químicas das diferentes amostras também foram determinadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico apresenta um apanhado bibliográfico sobre o conteúdo abordado na pesquisa, sendo dividido em subtópicos. Inicialmente será apresentada uma revisão sobre produtos com teor de açúcares reduzido, produção e características da matéria-prima utilizada neste trabalho, a banana da variedade Prata. Na segunda parte do tópico, serão apresentados o processo de desidratação osmótica, as variáveis importantes de controle e algumas tecnologias emergentes associadas ao método. Por fim, o processo de secagem de alimentos será discutido, bem como seus fatores de controle e toda a modelagem matemática envolvida.

2.1 Produtos com teor de açúcares reduzido

Nos últimos anos, a conscientização do impacto da alimentação na saúde aumentou progressivamente, de modo que os consumidores alteraram cada vez mais suas dietas e o tipo de alimento consumido, alimentando-se de forma mais saudável. Tais mudanças incluem o consumo elevado de frutas e vegetais, além da redução da ingestão de produtos com muitos aditivos químicos e elevado valor calórico (DENG *et al.*, 2019; MALDONADO *et al.*, 2020). Além disso, o aumento da incidência de doenças crônicas é um importante fato que tem estimulado novas pesquisas no ramo alimentício. O controle estrito dos níveis de glicose sanguínea e da pressão arterial por meio da alimentação adequada pode ser a chave para a prevenção da progressão de diversas doenças cardiovasculares, além da obesidade e diabetes (MAEDA *et al.*, 2013; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

A obesidade epidêmica e diabetes são as principais doenças que levaram a indústria de alimentos à substituição da sacarose por outros edulcorantes em suas formulações. Visando atender a redução recomendada de calorias, novos produtos foram introduzidos no mercado, especialmente aqueles com alegação funcional e teor de açúcares reduzidos. A incorporação de compostos de baixo índice glicêmico, como os edulcorantes aspartame e sacarina, tem sido muito utilizada (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). Os edulcorantes, ou adoçantes, são aditivos alimentares substitutos ao açúcar, que geralmente apresentam propriedades sensoriais e tecnológicas semelhantes às da sacarose. Possuem grande aceitação e aplicação, pois apresentam baixo valor calórico. São compostos que tendem a ter uma doçura desejável, mas não são metabolizados no corpo humano e, portanto, não fornecem ingestão de calorias (CHATTOPADHYAY; RAYCHAUDHURI; CHAKRABORTY, 2014). A isomaltulose, comercialmente conhecida

como palatinose, é um exemplo recente de um ingrediente alternativo de açúcares convencionais (SAWALE *et al.*, 2017).

Os produtos com baixo teor de açúcar tornaram-se uma tendência de mercado, e sua produção basicamente compreende a utilização de matérias-primas de reduzido valor calórico (PEINADO *et al.*, 2013). Apesar de frutas e vegetais apresentarem quantidades reduzidas de calorias, seu uso combinado com diferentes matérias-primas pode resultar na elevação do valor energético do produto final. As frutas apresentam em sua constituição sólidos solúveis como açúcares de alto valor calórico, como sacarose, glicose e frutose (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

A redução do teor calórico de vegetais e frutas desidratados, como a banana, é possível, mantendo ainda seu sabor característico. Alguns trabalhos na literatura sugerem que o conteúdo de açúcar de frutas e vegetais pode ser minimizado a partir da imersão do alimento em água destilada submetendo-o à energia ultrassônica (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2011; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). A técnica proposta é denominada substituição de açúcar em dois estágios (*Dual Stage Sugar Substitution – D3S*), sendo aplicada previamente a processos de secagem de frutas. No estágio inicial, o tratamento ultrassônico é aplicado para a remoção dos açúcares de alto valor calórico da fruta, enquanto no estágio final objetiva-se a introdução de um adoçante, restaurando a doçura original do alimento (MEDEIROS *et al.*, 2016; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

2.2 Banana (*Musa spp.*)

A banana (*Musa spp.*) é uma fruta popular e de alto valor nutricional, cultivado em quase todos os países de clima tropical, com elevado consumo mundial (FARHANINEJAD *et al.*, 2017). A fruta, comumente, apresenta as seguintes características: são estreitados na base, em um pedicelo de aproximadamente 1 cm, e no ápice em uma tonalidade proeminente de 0,6 a 1,5 cm de comprimento. O pericarpo (em torno de 2 mm de espessura) apresenta uma cor amarela intensa em plena maturação, e a polpa é de cor amarela clara apresentando sementes pretas (MATHEW; NEGI, 2017). A parte comestível da banana é uma rica fonte de vitaminas e minerais, podendo contribuir com as necessidades diárias recomendadas de vitamina C, potássio, magnésio, cobre e boro. O conteúdo mineral da fruta pode ser variável quanto ao estágio de maturação, condições agroclimáticas, entre outros fatores (MATHEW; NEGI, 2017). A polpa da banana ainda é reconhecida pela composição rica em compostos antioxidantes,

como algumas vitaminas, carotenoides e compostos fenólicos, como epicatequina, lignina, taninos e antocianinas (BENNETT *et al.*, 2010; PEREIRA; MARASCHIN, 2015).

Devido às suas características sensoriais e expressivo valor nutricional, a banana é uma fruta com grande aceitação. A casca da banana representa uma “embalagem” individual, de fácil remoção, higiênica, sendo assim, prática e conveniente. A ausência de sementes duras e suco na polpa, além da sua disponibilidade e produção durante todo o ano, também contribuem para a sua comercialização e consumo alto (MATSUURA; DA COSTA; FOLEGATTI, 2004).

A banana representa uma fonte nutricional e de renda para milhões de pessoas. No Brasil, o 4º maior produtor mundial da fruta, no ano de 2019 a banana foi a segunda fruta com maior consumo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2020). As variedades de banana mais cultivadas no país são as de mesa, como prata, nanica, maçã e ouro.

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE apontam que a produção de banana no Brasil no início do ano de 2021 foi de 6.939.700 toneladas, enquanto em 2020 a produção foi de 6.718.160 toneladas. Em 2019, o agronegócio de banana brasileiro exportou cerca de US\$ 24,4 milhões de bananas frescas e secas, o que representa aproximadamente 79,4 milhões de toneladas da fruta. As exportações brasileiras de bananas frescas e secas estão concentradas em poucas regiões do país, sendo igualmente concentradas quanto aos países de destino (IBGE, 2021).

2.2.1 Banana Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety)

A banana Prata (FIGURA 1) é uma das variedades de banana de grande consumo no Brasil. Caracteriza-se por ser uma fruta pequena, mais reta e menos doce que outras variedades de banana, como a banana-maçã (*Musa acuminata*) e a banana-nanica (*Musa Spp. Cavendish*), por exemplo. Apresenta textura mais consistente, apresentando diferentes aplicações na culinária (MERCALI *et al.*, 2010). Essa variedade possui alto valor nutritivo, sendo uma fruta rica em amido e açúcares, assim como vitaminas A e C e minerais como fósforo e potássio (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2017; TIROUTCHELVAME; MARAN; PRAGALYAASHREE, 2019).

Como sua composição é rica em compostos benéficos para a saúde, como vitaminas e antioxidantes, o consumo de banana Prata na dieta diária oferece muitos benefícios para a saúde, como redução da pressão arterial, combate à formação de radicais livres, suporte à saúde cardíaca e controle da diabetes (TIROUTCHELVAME; MARAN; PRAGALYAASHREE,

2019), além de ser eficaz agente terapêutico, assim como a sua planta (MATHEW; NEGI, 2017).

Figura 1- Banana da variedade Prata.



Fonte: Da autora (2022).

A banana Prata é um fruto climatérico, com elevada taxa respiratória, produzindo, assim, níveis elevados de etileno após ser colhida. Tal característica desempenha um papel crítico no amadurecimento, o que resulta em mudanças físicas e químicas que alteram a textura da polpa, aroma, sabor e a coloração da casca (PAULA *et al.*, 2018). As alterações nas características da fruta também interferem na perda da sua qualidade.

Do ponto de vista biológico, a banana apresenta uma das maiores perdas na produção devido ao seu elevado conteúdo de água. Isso a torna extremamente perecível e impedindo o uso do frio para o seu armazenamento. Tal fato sugere a industrialização como alternativa para melhorar o aproveitamento da produção (SANT'ANA SILVA *et al.*, 2009). Desse modo, a desidratação osmótica e a secagem da banana prata são alternativas para reduzir a perda pós-colheita da fruta, além de produzir frutos secos (KADAM; DHINGRA, 2011).

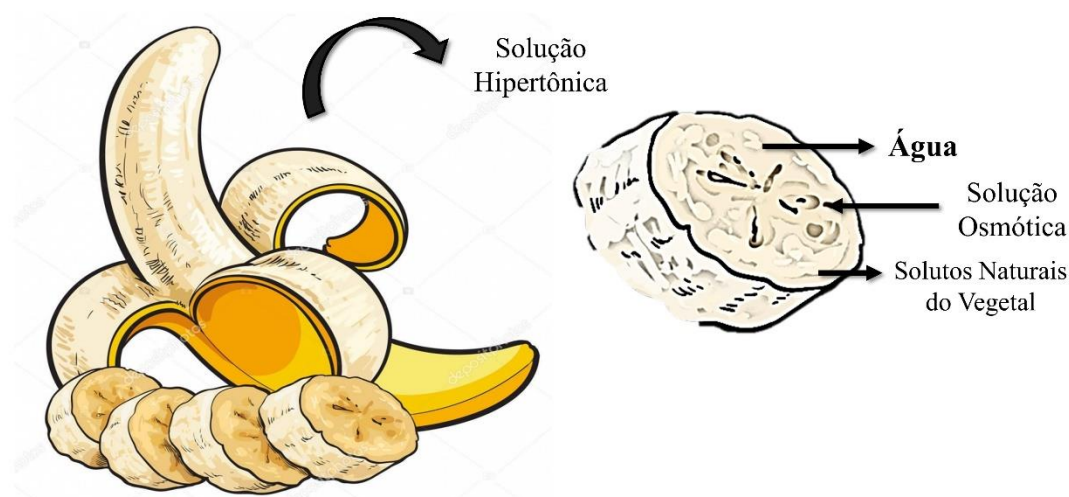
2.3 Desidratação osmótica

O processo de desidratação osmótica representa um tratamento complementar e uma técnica de preservação de alimentos a partir da retirada de água, reduzindo perdas pós-colheita de frutas e vegetais. É uma etapa comum na produção de frutas secas, que podem ser consumidas diretamente ou usadas como ingredientes culinários (MERCALI *et al.*, 2011; RAMYA; JAIN, 2017).

O método consiste na combinação de dois processos: o de desidratação e o de impregnação. O alimento é imerso em uma solução concentrada de açúcar ou sal, promovendo, assim, a remoção da água do tecido celular, devido à diferença de potencial químico entre a solução externa e a fase líquida interna das células (PORCIUNCULA *et al.*, 2013; RAMYA; JAIN, 2017). Além disso, como há a abertura da estrutura do tecido celular, a difusão da solução externa e posterior ganho hidrodinâmico podem ocorrer. Tal ganho contribui para fluxos opostos de água e soluto, permitindo que o tecido fique concentrado. A taxa de ganho de soluto/perda de água depende das condições empregadas durante o processo (CHIRALT; FITO, 2003).

Durante a desidratação osmótica, o gradiente de concentração que ocorre entre a solução hipertônica e o líquido intracelular resulta em uma pressão osmótica elevada, que atua como força motriz para a difusão da água do tecido celular para a solução extracelular. Se a membrana é perfeitamente semipermeável, há uma incapacidade do soluto em se difundir para o interior celular. Entretanto, é muito difícil a obtenção de uma membrana perfeitamente semipermeável nos alimentos, devido à complexidade da estrutura interna celular. Assim, comumente há a difusão de solutos no alimento e lixiviação dos próprios solutos do alimento, como açúcares, ácidos orgânicos, minerais, entre outros, na solução osmótica. Desse modo, o transporte de massa é resultante da combinação de três fluxos simultâneos de água e soluto em contracorrente (RAMYA; JAIN, 2017; VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014), apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxos de transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.



Fonte: Da autora (2022).

A umidade é removida por fluxo capilar seguido de difusão, enquanto a lixiviação de compostos celulares e ganho de solutos ocorrem apenas por difusão. A transferência de massa ocorrerá até que o equilíbrio entre os meios seja atingido (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; YU *et al.*, 2018). A alteração do sabor da fruta fresca, o aumento do teor de açúcares e a extração de alguns ácidos orgânicos, tornam os produtos desidratados por osmose mais aceitáveis (OSORIO *et al.*, 2007; STOJANOVIC; SILVA, 2007). Além disso, o tratamento osmótico é uma eficiente estratégia na prevenção de alterações indesejáveis nos alimentos, promovendo a estabilização do sabor e da cor, além de reduzir substancialmente a quantidade de energia gasta no tratamento térmico subsequente (OLIVEIRA; BRANDÃO; SILVA, 2015; RAMYA; JAIN, 2017). Melhoria nutricional e sensorial do produto pode ser observada após a incorporação de solutos pela técnica (RAMYA; JAIN, 2017). Entretanto, o processo também apresenta desvantagens, entre elas a baixa estabilidade de armazenamento, fazendo-se necessária secagem posterior do produto, para completa remoção da umidade (CHIRALT; FITO, 2003; RAMYA; JAIN, 2017).

É importante ressaltar que o processo de desidratação osmótica resulta em produtos com umidade na faixa de 65 a 75% e atividade de água 0,94 a 0,97. Sendo assim, pré e pós-tratamentos podem ser selecionados de maneira a potencializar a taxa de transferência de massa. Diferentes tecnologias vêm sendo aplicadas, incluindo: micro-ondas (SHARIF *et al.*, 2018), campo elétrico pulsado (DERMESONLOUGLOU *et al.*, 2018; TRAFFANO-SCHIFFO *et al.*, 2017), ultrassom (ALLAHDAD *et al.*, 2019; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017; NOWACKA *et al.*, 2014, 2018) e pulso de vácuo (JUNQUEIRA *et al.*, 2017b; SULISTYAWATI *et al.*, 2018).

O uso de novas tecnologias juntamente ao tratamento osmótico, como energia ultrassônica, pode elevar os teores de compostos bioativos e nutricionais do produto final, ao mesmo tempo que intensificam a transferência de massa. A diminuição da temperatura do processo, alteração da pressão e a aplicação de novas formas de energia podem reduzir significativamente a perda de compostos termolábeis, aprimorando a qualidade do produto final e garantindo a qualidade sensorial do produto desidratado (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; CIURZYŃSKA *et al.*, 2016).

Prosapio e Norton (2017) avaliaram a influência da desidratação osmótica na secagem convectiva e liofilização de morangos. Os autores destacaram que a aplicação do pré-tratamento permitiu uma redução significativa no tempo de secagem e uma melhor retenção das propriedades mecânicas e estruturais da fruta, além de melhorar a capacidade de reidratação no caso das amostras secas.

Bozkir e Ergün (2020), em estudo com caquis, observaram efeito positivo do uso da desidratação osmótica previamente à secagem convectiva. O pré-tratamento resultou em tempos de secagem menores e melhor qualidade do produto final. Além disso, a combinação do ultrassom ao processo de osmose resultou em manutenção do conteúdo de compostos fenólicos da fruta e minimizou mudanças significativas na coloração.

Na desidratação osmótica de fatias de pêsego, foi observado que as variáveis de temperatura de processo e concentração da solução osmótica influenciaram de forma mais significativa o produto final. Amostras desidratadas em soluções mais concentradas de sacarose apresentaram maior aceitabilidade por parte dos provadores do painel sensorial (GERMER *et al.*, 2010).

A banana, por ser uma fruta de fácil acesso, já foi utilizada em inúmeros trabalhos de desidratação osmótica, com diferentes soluções e condições de processo, conforme apresentado na Tabela 1. É possível observar grande utilização da sacarose e/ou xarope de sacarose como principais solutos no processo osmótico. Foram encontrados poucos trabalhos que desidrataram banana por osmose utilizando solutos de reduzido valor calórico e baixo índice glicêmico.

Tabela 1 - Estudos da aplicação da desidratação osmótica em diferentes variedades de bananas (Continua).

| Variedade | Agente Osmótico | Temperatura do processo (°C) | Referência |
|---|---|-------------------------------------|--|
| Banana-da-terra (<i>Musa paradisiaca</i>) | Xarope de Sacarose (60 °Brix) | 60 – 70 | (CHAVAN; PRABHUKHANOLKAR; PAWAR, 2010) |
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i>) | Sacarose (50 – 70 °Brix) | 50 – 70 | (FERNANDES <i>et al.</i> , 2006) |
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i>) | Sacarose (55 – 65 °Brix) | 65 | (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2006) |
| Banana Prata (<i>Prata cultivar</i>) | NaCl (0 - 10 g/100 g) Sacarose (30 - 60 g/100 g) | 25 – 55 | (MERCALI <i>et al.</i> , 2011) |
| Banana “Gran Naine” (<i>Cavendish cultivar</i>) | Sacarose (40 – 70 °Brix) | 25 – 35 | (RASTOGI; RAGHAVARAO; NIRANJAN, 1997) |
| Banana-Maçã (<i>Musa Manzano</i>) | Sacarose (40 – 60 °Brix) | 40 – 70 | (DA SILVA JÚNIOR <i>et al.</i> , 2017) |
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i> AAA) | Sacarose (40 – 60 °Brix) | 21 | (FARHANINEJAD <i>et al.</i> , 2017) |
| Banana “Gran Naine” (<i>Musa cavendish</i>) | Sacarose (30 – 70 °Brix) | 30 – 70 | (VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014) |

Tabela 1 - Estudos da aplicação da desidratação osmótica em diferentes variedades de bananas (Conclusão).

| Variedade | Agente Osmótico | Temperatura do processo (°C) | Referência |
|--|--|-------------------------------------|--|
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i>) | Sacarose (30 – 40 °Brix) | 20 – 23 | (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012) |
| Banana “Gros Michel” (<i>Musa acumiata C.V. Gros Michel</i>) | Sacarose (60 °Brix) | 35 | (WALISZEWSKI; PARDIO; OVANDO, 2007) |
| Banana “Gran Naine” (<i>Musa cavendish</i>) | Sacarose (45, 55 e 65 °Brix) | 30 – 50 | (ATARES; GALLAGHER; OLIVEIRA, 2011) |
| Banana “Gran Naine” (<i>Musa cavendish</i>) | Sorbitol (50 - 60 g/100 g) Glicerol (50 - 60 g/100 g) | 25 | (CHAGURI <i>et al.</i> , 2017) |
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i>) | Sacarose (50 – 70 °Brix) | 50 – 70 | (FERNANDES; RODRIGUES, 2007) |
| Banana Nanica (<i>Musa acuminata spp.</i>) | Sacarose (45 – 65 °Brix) | 30 – 50 | (ALMEIDA <i>et al.</i> , 2015) |
| Banana Nanica (<i>Musa spp.</i>) | Sacarose (65 °Brix) | 25 | (AMAMI <i>et al.</i> , 2014) |
| Banana Prata (<i>Prata cultivar</i>) | Xarope de Yacon (30 – 45 °Brix) | 30 | (MACEDO <i>et al.</i> , 2021) |

Fonte: Da autora (2022).

2.3.1 Fatores que afetam o tratamento osmótico

O processo de perda de água e impregnação de solutos pode ser afetado por diversos fatores, dentre eles: o tipo de agente osmótico utilizado e a sua concentração, a temperatura da solução osmótica, tempo de imersão, proporção entre a solução e a quantidade de alimento, além das propriedades físico-químicas do próprio produto (VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014; YADAV; SINGH, 2014). Alguns desses fatores serão discutidos a seguir.

2.3.1.1 Tempo de imersão

O tempo de imersão da amostra na solução osmótica é um dos fatores de grande importância, pois é determinante para a manutenção da integridade da estrutura da parede celular (CHIRALT; FITO, 2003). De forma geral, à medida que o tempo de imersão aumenta, a perda de massa também aumenta, porém em uma taxa menor. A taxa de transferência de massa é mais intensa nas fases iniciais do processo osmótico, tendendo a diminuir gradualmente com o tempo, até que o equilíbrio seja alcançado (CORRÊA *et al.*, 2011; PRITHANI; DASH, 2020; YADAV; SINGH, 2014; ZOU *et al.*, 2013).

Nos primeiros minutos de processo osmótico, a rápida perda de água e ganho de soluto é resultante da grande força motriz entre a solução hipertônica e o conteúdo celular. Com a progressão do tempo, a água migra da amostra para a solução e o soluto da solução para a amostra e, portanto, a diferença no conteúdo de água entre o alimento e a solução osmótica diminui, causando redução na velocidade do processo osmótico (DASH; BALASUBRAMANIAM; KAMAT, 2019). Desse modo, é muito importante identificar o tempo de processamento apropriado para encontrar uma boa relação entre a dessorção de água e a absorção de sólidos pelo alimento (PROSAPIO; NORTON, 2017).

Alimentos com a parede celular menos rígida e pouco resistente ao processo de desidratação necessitam de um tempo menor de contato com a solução osmótica. Durante o processo, a membrana celular vai sofrendo modificações e, assim, passa a não fornecer barreira efetiva ao soluto, ficando este livre para penetrar em todo o tecido vegetal (CHIRALT; FITO, 2003; MERCALI *et al.*, 2011; RAMYA; JAIN, 2017).

Entretanto, o tempo de imersão pode afetar a atividade de água do produto final seco. Em estudos com mangas, foi observado que o aumento do tempo de imersão elevou a atividade de água do produto seco final. Os autores associaram o resultado à presença de sólidos

incorporados no tratamento osmótico, que criaram um efeito barreira na migração e evaporação de água durante a secagem convectiva (ZOU *et al.*, 2013). Resultados semelhantes foram observados em outros trabalhos (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017; ODEWOLE; OLANIYAN, 2016).

2.3.1.2 Temperatura da solução osmótica

A temperatura de condução do processo osmótico exerce grande influência no processo final. É um parâmetro importante, pois interfere na permeabilidade da membrana celular e na viscosidade da solução osmótica (PROSAPIO; NORTON, 2017). Maior perda de água e ganho de solutos também estão associados a temperaturas de solução mais elevadas, devido ao aumento na taxa de difusão (RAMYA; JAIN, 2017).

Temperaturas mais elevadas de processo diminuem a viscosidade da solução osmótica, reduzindo, assim, a resistência externa à taxa de transferência de massa na superfície do produto. Desse modo, o escoamento da água da fruta é facilitado, com altas taxas de difusão do soluto na fruta (DASH; BALASUBRAMANIAM; KAMAT, 2019; RAMYA; JAIN, 2017).

O aumento da temperatura favorece o colapso da estrutura celular, resultando na redução da permeabilidade e seletividade da parede, favorecendo a lixiviação dos compostos naturais do alimento para a solução osmótica (ALMEIDA *et al.*, 2015). Esses processos ocorrem de forma simultânea, por indução da temperatura, responsáveis pela alteração geral na textura do alimento e redução do turgor da parede celular (LANDIM; BARBOSA; BARBOSA JÚNIOR, 2016).

Em bananas, foi observado que quanto maior a temperatura da solução osmótica, menor foi a retenção de compostos fenólicos na fruta, efeito similar ocorrido com o aumento do tempo de processamento. Temperaturas de solução mais elevadas podem acelerar a hidrólise das moléculas, diminuindo o grau de polimerização de alguns compostos fenólicos e, assim, favorecendo a lixiviação de moléculas de menor peso (ALMEIDA *et al.*, 2015). Em físalis, o uso de soluções osmóticas com temperaturas de 70 °C resultou em maior degradação de carotenoides, especialmente o β -caroteno (LUCHESE; GURAK; MARCZAK, 2015).

Além disso, temperaturas de solução mais altas podem resultar em maior alteração da coloração do produto final, devido à degradação e lixiviação de pigmentos (LANDIM; BARBOSA; BARBOSA JÚNIOR, 2016). A diminuição da temperatura do processo, alteração da pressão e a aplicação de novas formas de energia podem reduzir significativamente a perda

de compostos termolábeis e pigmentos, aprimorando a qualidade do produto final e garantindo a qualidade sensorial do produto desidratado (CIURZYŃSKA *et al.*, 2016).

2.3.1.3 Solução osmótica

A solução osmótica empregada no processo de desidratação deve apresentar uma baixa atividade de água, representada geralmente por alta concentração da solução. Além disso, o soluto deve ser sensorialmente agradável (VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014). O soluto deve ser não tóxico, apresentar alta solubilidade e ser prontamente dissolvido para formar uma solução altamente concentrada, não reagindo com o alimento.

Convencionalmente, solutos de baixo peso molecular apresentam melhor desempenho, uma vez que possuem maior capacidade de penetração no tecido vegetal, quando comparados com solutos de maior peso molecular. A taxa de penetração do soluto é diretamente proporcional à concentração de soluto e inversamente proporcional ao tamanho da molécula de soluto (RAMYA; JAIN, 2017; YADAV; SINGH, 2014).

Em trabalhos prévios de desidratação osmótica de frutas e vegetais, diversos agentes osmóticos vêm sendo aplicados, como sacarose, glicose, xarope de amido, frutose, sorbitol, glicerol, xarope de milho, mel e cloreto de sódio (RAMYA; JAIN, 2017). O cloreto de sódio (NaCl) possui grande uso, pois é um agente osmótico que apresenta pressão osmótica elevada, quando comparado aos açúcares. Essa maior pressão osmótica deve-se às suas propriedades iônicas, favorecendo a transferência de massa, reduzindo a atividade de água do produto final (JUNQUEIRA *et al.*, 2017b).

Em cogumelos do tipo shimeji, a concentração e temperatura da solução osmótica tiveram importante papel na transferência de massa, em termos de perda de água e ganho de solutos. Amostras pré-tratadas em solução salina (45 °C) apresentaram menor taxa de secagem devido à deposição de moléculas na superfície do tecido celular (KAUR; KUMAR; ALAM, 2014).

Em estudo com banana, a impregnação da sacarose pelo tratamento osmótico acarretou em tempos de secagem mais longos e encolhimento significativamente maior da amostra. O ganho de solutos resultou em limitada expansão da parede celular da banana, devido à interação entre o grupo hidroxila da sacarose e do tecido celular, além de influenciar na transferência de calor e massa (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012).

O uso de lactato de cálcio, juntamente à sacarose na solução osmótica, resultou em incremento da textura de morangos desidratados. A penetração de íons de Ca^{2+} teve

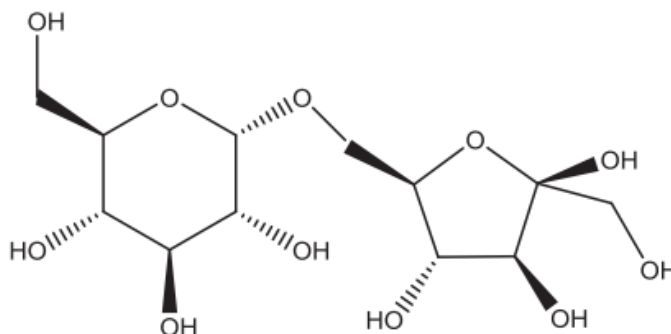
fundamental importância, devido à sua interação com os polímeros de ácido pécico, formando ligações cruzadas, reforçando a adesão celular, que é uma das principais causas de amolecimento da estrutura vegetal (TYLEWICZ *et al.*, 2017).

2.4 Isomaltulose (D-glucopiranosil-1, 6-frutose)

Nos últimos anos vem se destacando um crescente interesse nos alimentos consumidos pela população, especialmente nas suas propriedades glicêmicas e contribuições nutricionais. Estudos inferem que alimentos com baixo índice glicêmico são importantes, pois contribuem para o prolongamento da sensação de saciedade, além de uma liberação sustentada de energia. Como uma possibilidade de modificação dos alimentos tradicionais, há a substituição dos carboidratos convencionais, mais rapidamente digeridos, por carboidratos de baixo índice glicêmico. A isomaltulose, comercialmente conhecida como palatinose, representa uma alternativa de substituição (HOLUB *et al.*, 2010).

A isomaltulose é um dissacarídeo redutor composto de glicose e frutose unidos por ligação glicosídica do tipo α -1,6 (FIGURA 3). Apresenta valor calórico equivalente ao da sacarose (4 kcal/g), com grande aplicabilidade como ingrediente funcional no desenvolvimento de alimentos e bebidas com baixo índice glicêmico (HOLUB *et al.*, 2010; OKUNO *et al.*, 2010). Está naturalmente presente no mel e na cana-de-açúcar e apresenta sabor e aparência similares a sacarose. Devido à sua ligação glicosídica, isomaltulose é dificilmente quebrada pelas bactérias orais e, portanto, não é cariogênica, embora seja completamente hidrolisada pelas dissacaridases do intestino delgado (HOLUB *et al.*, 2010).

Figura 3- Estrutura química da palatinose.



Fonte: Shyam, Ramadas e Chang (2018).

Durante a sua ingestão, a isomaltulose é hidrolisada no intestino, em glicose e frutose, a uma taxa mais lenta quando comparada a sacarose, resultando em um menor nível de glicose

no sangue. Tal característica adequa a sua aplicação em dietas nutritivas que requerem uma absorção lenta de glicose, evitando, assim, aumento rápido dos níveis de glicose no sangue pós-prandial (TONOUCHI *et al.*, 2011).

Devido à sua alta estabilidade contra processos fermentativos, principalmente por leveduras e bactérias, a isomaltulose apresenta uso em diversos produtos alimentícios. Sua utilização pode ser efetiva na produção de produtos fermentados, como iogurte probiótico, elevando o nível de doçura, ou em cervejas, otimizando o perfil sensorial (SAWALE *et al.*, 2017).

Do ponto de vista físico-químico, a isomaltulose funde a uma temperatura inferior (123 a 124 °C) em comparação a sacarose (160 a 185 °C) e apresenta maior estabilidade em condições ácidas (LINA; JONKER; KOZIANOWSKI, 2002). Também é resistente à hidrólise ácida e, desse modo, é considerada mais estável em alimentos acidificados quando comparada a açúcares convencionais, embora apresente estabilidade térmica inferior à da sacarose. A isomaltulose apresenta temperatura de transição vítrea de aproximadamente 62 °C (SAWALE *et al.*, 2017).

Por ser considerado um substituto recente da sacarose, poucos trabalhos sobre sua aplicação em processos de desidratação foram encontrados na literatura.

Em um estudo visando à aplicabilidade da isomaltulose como substituto da sacarose na extração osmótica do suco da fruta umê, Kim *et al.* (2018) obtiveram resultados interessantes. O extrato obtido pela isomaltulose obteve pH e acidez titulável semelhantes aos extratos obtidos por demais açúcares. Além disso, o uso da isomaltulose resultou em extrato com maior atividade antioxidante e conteúdo de polifenóis superior.

Rubio-Arreaez *et al.* (2015), ao utilizarem a isomaltulose na desidratação osmótica de fatias de limão, observaram que o uso de tal dissacarídeo resultou em maior perda de massa pelas fatias. Entretanto, o nível de sólidos solúveis no produto final foi menor quando comparado a outros edulcorantes utilizados. Desse modo, os autores recomendam a combinação de oligofrutose com isomaltulose de forma a obter resultado mais satisfatório.

Peinado *et al.* (2013), em seu estudo, utilizaram uma mistura de sacarose com isomaltulose (30 °Brix) como agente osmótico na desidratação de morangos, visando avaliar os atributos sensoriais. Em análise com consumidores, concluíram que o uso de isomaltulose resultou em boa aceitação do produto, principalmente no quesito sabor, devido à maior retenção de compostos voláteis do morango maduro.

Em morangos, o processo osmótico também foi aplicado para a impregnação de isomaltulose (MACEDO *et al.*, 2022). Os autores observaram que a incorporação do composto

resultou em amostras com menor encolhimento após o processo de secagem. Além disso, o aumento do tempo de secagem, algumas perdas nutricionais, dureza e mudança de cor nos morangos secos foram atribuídos à desidratação osmótica.

2.5 Ultrassom

A utilização do ultrassom em alimentos é uma técnica relativamente nova. Basicamente, o ultrassom compreende ondas mecânicas que precisam de um meio elástico para se espalhar (PICÓ, 2013). Tal tecnologia consiste na aplicação de energia acústica, com frequências superiores a 20 kHz, causando alterações físico-químicas no alimento (MIANO; SABADOTI; AUGUSTO, 2018).

No momento em que as ondas ultrassônicas são transmitidas através de um fluido, a distância média dentro das moléculas será modificada, oscilando em sua posição de equilíbrio. Durante o ciclo de compressão, a distância intermolecular encurta e aumenta, em um ciclo de rarefação. A cavitação surge durante o ciclo de rarefação, em um momento de baixa pressão, gerando bolhas (MIANO; ROJAS; AUGUSTO, 2017; MIANO; SABADOTI; AUGUSTO, 2018). A geração de bolhas continua até o momento em que o sistema alcance a pressão mínima, fazendo com que o ciclo de compressão reinicie. Como consequência desses ciclos de compressão, tem-se o rompimento da parede celular de vegetais e frutos, facilitando a extração dos compostos ali contidos (RODRIGUES *et al.*, 2015). A alternância entre compressão e expansão dos tecidos celulares é denominado “efeito esponja” (MIANO; ROJAS; AUGUSTO, 2017; MIANO; SABADOTI; AUGUSTO, 2018).

A cavitação produzida por ultrassom pode atuar na remoção de umidade de um alimento. A deformação de materiais sólidos porosos, como vegetais e frutos, causada por ondas ultrassônicas, é responsável pela criação de canais microscópicos, reduzindo, assim, a camada limite de difusão, aumentando a transferência de massa (FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2008; MIANO; SABADOTI; AUGUSTO, 2018).

O aumento da transferência de massa, provocado pela cavitação gerada por ondas ultrassônicas em um meio líquido, apresenta algumas vantagens (RODRIGUES *et al.*, 2015). O ultrassom, em alimentos, pode induzir a formação de compostos químicos, além de gerar mudanças físicas no produto ao qual é aplicado. Tais mudanças são úteis na catálise de reações químicas e aceleração de processos extrativos (FERNANDES; RODRIGUES, 2008a). Além disso, consegue-se o processamento em temperatura ambiente, já que não é necessário aquecimento, reduzindo a degradação térmica (FERNANDES; RODRIGUES, 2012).

A utilização do ultrassom como pré-tratamento em processos de desidratação e secagem apresenta grande utilidade. Essa técnica envolve a imersão do alimento, em pedaços, em água ou solução aquosa hipertônica, para a qual é aplicado a energia ultrassônica. A aplicação de pré-tratamento por ultrassom aumenta a difusividade efetiva da água na fruta e conduz à secagem mais rápida (FERNANDES; RODRIGUES, 2008b; MAGALHÃES *et al.*, 2017). Além disso, vale ressaltar que o tratamento ultrassônico não irá incorporar sólidos solúveis na amostra caso apenas água destilada seja utilizada como solvente (FERNANDES; RODRIGUES, 2012).

Nowacka *et al.* (2014) combinaram o processo de desidratação osmótica com a energia de ondas ultrassônicas, observando efeito positivo na transferência de massa. Segundo os autores, tal efeito pode ser explicado pela criação de microcanais pela cavitação e pelo efeito esponja, característicos do uso de ultrassom em meios líquidos.

Em um estudo de secagem de mamão, constatou-se que a utilização do ultrassom foi eficaz na redução da perda nutricional do mamão seco, além de resultar em frutos desidratados com melhores características de cor e textura (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018).

A aplicação do processo ultrassônico por 20 minutos, como pré-tratamento ao processo osmótico, mostrou-se viável na redução do teor de açúcares e remoção de água, resultando em maior incorporação de sólidos em maçãs (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). Em estudo similar, também foi observado maior difusividade dos compostos do fruto após a aplicação do ultrassom como pré-tratamento (OLIVEIRA *et al.*, 2011). O tratamento com água destilada e imersão em banho ultrassônico provou ser um método viável para substituir açúcares de alto teor calórico do morango por açúcares de baixa caloria (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010).

2.6 Secagem convectiva

A desidratação de frutas e vegetais representa uma maneira de disponibilizar uma nova forma de consumo desses produtos ao mercado, além de aumentar a vida útil, que é naturalmente menor. O processo de secagem é uma das técnicas de preservação de alimentos mais antigas (GANESAPILLAI; REGUPATHI; MURUGESAN, 2011). A remoção da umidade do produto resulta em uma vida útil mais longa, visto que a atividade microbológica é minimizada, além de maior facilidade para transporte e armazenamento futuros. A técnica de secagem mais tradicional na indústria alimentícia é a utilização de ar quente ou secagem convectiva (OSTERMEIER *et al.*, 2018).

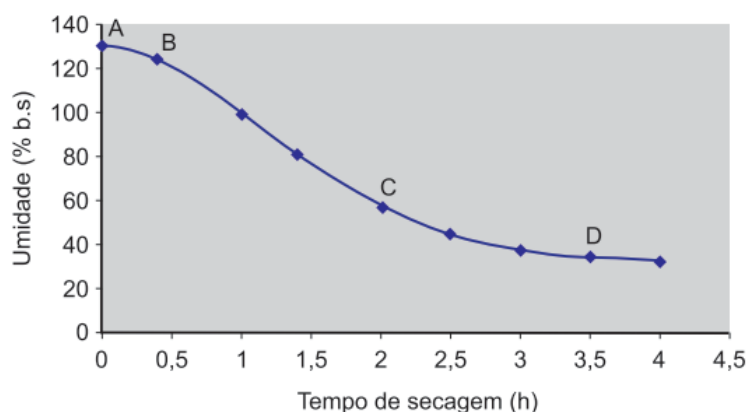
A secagem, por definição, é uma operação unitária que visa à remoção da água do produto e, conseqüentemente, reduz sua atividade de água (MUJUMDAR; LAW, 2010). Na secagem convectiva, a energia térmica é aplicada ao alimento úmido através do ar aquecido. O processo de remoção de água com o ar ocorre através da transferência simultânea de calor e massa. A energia é transferida para a superfície do alimento por convecção e, em seguida, é transferida para o interior por difusão ou convecção, dependendo da estrutura do alimento. Tal fluxo de calor resulta em um aumento da temperatura do alimento e conseqüente evaporação da água (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018). O ar quente é, assim, o meio de transporte para a umidade evaporada (OSTERMEIER *et al.*, 2018).

Para que um processo de secagem seja eficaz, vários fatores apresentam grande interferência, como: método de transferência de calor, continuidade ou descontinuidade do processo, direção dos fluidos de aquecimento em relação ao produto, pressão e temperaturas aplicadas, entre outros (GANESAPILLAI; REGUPATHI; MURUGESAN, 2011).

2.6.1 Mecanismos da secagem

A evolução da transferência de massa durante o processo de secagem pode ser dividida, de maneira didática, em três etapas, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Variação de umidade de um alimento durante o processo de secagem.



Fonte: Celestino (2010).

Denominado período de ajuste inicial (Intervalo A – B), representa o momento em que o alimento é disposto no secador e sua superfície é aquecida à temperatura de bulbo úmido. O período seguinte (Intervalo B – C) é denominado período de taxa constante, caracterizado pelo início da secagem. Nesta etapa, a água se move do interior do alimento na mesma taxa com que

evapora da superfície, embora a superfície do alimento permaneça úmida. É importante ressaltar que no período de taxa constante a temperatura da superfície do alimento permanece próxima da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem devido ao efeito de resfriamento da água que evapora (FELLOWS, 2019).

A terceira e última etapa do processo de secagem é denominada período de taxa decrescente, que é quando o teor de umidade do alimento é menor que o teor de umidade crítico. Nessa etapa, a taxa de secagem cai lentamente até que se aproxime de zero, no teor de umidade de equilíbrio, ou seja, quando o alimento entra em equilíbrio com o ar seco. O período de taxa decrescente é observado como a parte mais longa de um processo de secagem (FELLOWS, 2019).

2.6.2 Modelagem matemática da secagem convectiva

Comumente, a taxa na qual os alimentos são desidratados na prática podem se diferir do modelo acima idealizado. O cálculo da taxa de secagem é muito complexo e inúmeros fatores podem interferir no resultado, como a quantidade de alimento disposta no secador, velocidade do ar de secagem, composição química do produto, entre outros (FELLOWS, 2019). De forma a abordar todas as complexidades da secagem, a modelagem matemática é útil na descrição do processo. Além disso, a modelagem do processo permite a obtenção de condições operacionais adequadas através da otimização a partir do uso de equações matemáticas (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

Diversos são os modelos matemáticos que podem ser aplicados na descrição e otimização da secagem convectiva. Equações de fenômenos de transporte, que consideram a transferência de massa e calor ao longo do processo, são comumente estabelecidas. Existem casos simplificados para modelagem e simulação, em que a equação geral de transporte é expressa por meio do sistema de equações diferenciais parciais sob diferentes condições e restrições. Variáveis como dimensão da amostra, propriedades do alimento e encolhimento são algumas das que devem ser consideradas durante toda a modelagem do processo de secagem (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

As equações matemáticas que são aplicadas na modelagem matemática do processo de secagem convectiva são divididas em duas categorias: as equações semiteóricas e as equações teóricas. A primeira categoria abrange os modelos sob o conceito de secagem em camada fina ou camada delgada. Já a segunda categoria engloba os modelos baseados no processo físico fundamental da secagem convectiva. Os modelos teóricos estudam a transferência de calor,

massa e quantidade de movimento em dois domínios (amostra e ar), a partir de sistemas não-lineares. As equações dos modelos teóricos são baseadas na equação geral do transporte, derivadas das leis da física como a lei de Fourier, segunda lei de Fick e lei de Newton para a transferência de momento (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018).

Os modelos semiteóricos apresentam grande aplicabilidade e representam uma boa ferramenta para modelar a cinética de secagem de frutas e vegetais (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018; SAGAR; SURESH KUMAR, 2010). Esses modelos abordam o processo de secagem em camada delgada, isso é, uma fina camada uniforme de amostra totalmente exposta a uma corrente de ar. Do ponto de vista matemático, em camada delgada, a secagem apresenta uma variação de dimensão infinitamente pequena, o que permite considerar a transferência de umidade e calor uniforme pela massa de amostra (ERTEKIN; FIRAT, 2017).

Os dados experimentais obtidos de processos de secagem podem ser ajustados em alguns modelos matemáticos (TABELA 2) considerando secagem em camada delgada. Tradicionalmente, a razão de umidade (MR) das amostras é calculada conforme abaixo (Eq. 1).

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \approx \frac{X_t}{X_o} \quad (1)$$

Em que X_t , X_o e X_{eq} são o teor de umidade em qualquer momento da secagem, teor de umidade inicial e o teor de umidade em equilíbrio (JUNQUEIRA *et al.*, 2017a).

Tabela 2 - Equações empíricas aplicadas às curvas de secagem.

| Modelo | Equação matemática |
|-------------------|--|
| Newton | $MR = \exp(-kt)$ |
| Page | $MR = \exp(-kt^n)$ |
| Logarítmica | $MR = a \cdot \exp(-kt) + b$ |
| Wang & Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ |
| Henderson & Pabis | $MR = a \cdot \exp(-kt)$ |
| Midilli | $MR = \exp(-kt^n) + b \cdot t$ |
| Dois termos | $MR = a \cdot (-k_1 t) + (1 - a) \exp(-k_2 t^n)$ |

Em que: MR é a razão de umidade, t é o tempo de secagem (s), e a, b e k são as constantes empíricas e coeficientes das equações de secagem.

Fonte: Junqueira *et al.* (2017a) e Macedo *et al.* (2020).

2.7 Secagem por infravermelho

Apesar da secagem convectiva apresentar grandes vantagens, como a rapidez do processo e estabilidade do produto final, sua aplicação demanda elevado consumo energético e maior encolhimento das amostras. O uso da radiação de infravermelho na secagem convectiva de alimentos tem se mostrado uma promissora alternativa devido à sua simplicidade e praticidade (EL-MESERY; KAMEL; EMARA, 2021; ZHAO *et al.*, 2019). Ademais, quando associado com outras técnicas de secagem, o uso de infravermelho pode melhorar a difusividade, energia de ativação, além de reduzir o tempo operacional (CHAKRABORTY; SAMANTA, 2017).

A radiação infravermelha é constituída de ondas eletromagnéticas originadas de uma fonte de calor que não requer um meio para a sua emissão. São ondas que estão localizadas na faixa externa da luz vermelha visível, apresentando comprimentos de onda variando de 0,75 a 1000 μm . A energia infravermelha emitida pela fonte de calor irradia para a superfície aquecida e penetra diretamente nas camadas internas do alimento, elevando o nível de energia vibracional das moléculas, gerando calor e aumentando a temperatura (HUANG *et al.*, 2021). Assim, a energia das moléculas internas de água aumenta promovendo a difusão da umidade e evaporação (ZHAO *et al.*, 2019). Além disto, o alimento é aquecido rapidamente e de forma uniforme, sem transferência de energia para o ar circundante, resultando em um processo com consumo energético relativamente menor que outras técnicas de secagem (SWASDISEVI *et al.*, 2009).

É importante ressaltar que a profundidade da penetração da radiação infravermelha é dependente das características do alimento a ser desidratado, como o seu teor de umidade, e do comprimento de onda da radiação (HUANG *et al.*, 2021). Comumente, é observado pela literatura que a cinética de secagem é otimizada com o aumento da potência do infravermelho, temperatura de secagem e diminuição da distância do infravermelho (HUANG *et al.*, 2021; SWASDISEVI *et al.*, 2009).

A aplicação de radiação infravermelha como fonte de calor na desidratação foi encontrada em estudos com maçã (EL-MESERY; KAMEL; EMARA, 2021), jaca (FENG *et al.*, 2021), banana (PUANGSUWAN *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2020), entre outras.

Em estudo com bananas, foi demonstrado que o uso de radiação infravermelho reduziu significativamente o tempo de secagem comparado com a secagem com ar quente. Quando o infravermelho foi associado com temperaturas mais elevadas de processamento, o tempo de secagem reduziu em 59%. Além disso, foi demonstrado que o uso de radiação infravermelha

resultou em amostras com estruturas mais porosas e com a presença de microcanais na superfície (SHI *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, F. R.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1–20, Sept. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583597/>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 34, p. 29–43, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416000072>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- ALLAHDAD, Z. *et al.* Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 244, p. 202–211, Mar. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877418304059>. Acesso em: 22 ago. 2021.
- ALMEIDA, J. A. R. *et al.* Effect of temperature and sucrose concentration on the retention of polyphenol compounds and antioxidant activity of osmotically dehydrated bananas. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 39, n. 6, p. 1061–1069, Dec. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12321>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- AMAMI, E. *et al.* Osmotic dehydration of some agro-food tissue pre-treated by pulsed electric field: Impact of impeller's Reynolds number on mass transfer and color. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [Saudi Arabia], v. 26, n. 1, p. 93–102, Jan. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363912000335>. Acesso em: 27 dez. 2021.
- ATARES, L.; GALLAGHER, M. J. S.; OLIVEIRA, F. A. R. Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 103, n. 4, p. 401–408, Apr. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877410005479>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- BENNETT, R. N. *et al.* Phenolics and antioxidant properties of fruit pulp and cell wall fractions of postharvest banana (*Musa acuminata* Juss.) cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [Washington], v. 58, n. 13, p. 7991–8003, July 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20553046/>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- BOZKIR, H.; ERGÜN, A. R. Effect of sonication and osmotic dehydration applications on the hot air drying kinetics and quality of persimmon. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 131, Sept. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643820306939>. Acesso em: 27 jan. 2022.

CANO-LAMADRID, M. *et al.* Influence of osmotic dehydration pre-treatment and combined drying method on physico-chemical and sensory properties of pomegranate arils, cultivar *Mollar de Elche*. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 232, p. 306–315, Oct. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814617306076>. Acesso em: 27 ago. 2021.

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 223, p. 152–167, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417305393>. Acesso em: 20 ago. 2021.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.

CHAGURI, L. *et al.* Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: Modeling, physical-chemical properties, color, and texture. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 10, n. 4, p. 615–629, Apr. 2017. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/en/publicacao/129590/green-banana-musa-cavendishii-osmotic-dehydration-by-non-c/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

CHAKRABORTY, R.; SAMANTA, R. Concurrent osmotic dehydration and vacuum drying of kiwi fruit (*Actinidia Deliciosa* cv. Hayward) under far infrared radiation: process optimization, kinetics and quality assessment. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 40, n. 2, p. 1–9, Apr. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12391>. Acesso em: 27 ago. 2021.

CHATTOPADHYAY, S.; RAYCHAUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. Artificial sweeteners – a review. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 51, n. 4, p. 611–621, Apr. 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24741154/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

CHAVAN, U. D.; PRABHUKHANOLKAR, A. E.; PAWAR, V. D. Preparation of osmotic dehydrated ripe banana slices. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 47, n. 4, p. 380–386, Aug. 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23572657/>. Acesso em: 27 ago. 2020.

CHIRALT, A.; FITO, P. Transport mechanisms in osmotic dehydration: The role of the structure. **Food Science and Technology International**, [London], v. 9, n. 3, p. 179–186, June 2003. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1082013203034757?journalCode=fstc>. Acesso em: 22 ago. 2019.

CIURZYŃSKA, A. *et al.* Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. **Trends in Food Science and Technology**, [London], v. 50, p. 186–192, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224416000200>. Acesso em: 17 jun. 2021.

CORRÊA, J. L. G. *et al.* Drying of pineapple by microwave-vacuum with osmotic pretreatment. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 29, n. 13, p. 1556–1561, Aug. 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.582558>. Acesso em: 27 ago. 2021.

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**, [Oxford], v. 41, p. 284–291, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416306725>. Acesso em: 27 ago. 2021.

DA SILVA JÚNIOR, E. V. *et al.* Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 97, p. 317–322, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306005>. Acesso em: 07 ago. 2019.

DA SILVA JÚNIOR, A. F. *et al.* Osmotic dehydration kinetics of banana slices considering variable diffusivities and shrinkage. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 20, n. 6, p. 1313–1325, Jan. 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2016.1209215>. Acesso em: 27 ago. 2021.

DASH, K. K.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; KAMAT, S. High pressure assisted osmotic dehydrated ginger slices. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 247, p. 19–29, Apr. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877418305065>. Acesso em: 27 ago. 2021.

DE OLIVEIRA, L. F. *et al.* Reuse of sorbitol solution in pulsed vacuum osmotic dehydration of yacon (*Smallanthus sonchifolius*). **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–6, Dec. 2017. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.13306>. Acesso em: 17 jan. 2021.

DENG, L.-Z. *et al.* Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes—a comprehensive review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], v. 59, n. 9, p. 1408–1432, Jan. 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29261333/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

DERMESONLOUOGLU, E. *et al.* Combined effect of pulsed electric field and osmotic dehydration pre-treatments on mass transfer and quality of air dried goji berry. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 49, p. 106–115, Oct. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856418303370>. Acesso em: 22 ago. 2021.

EL-MESERY, H. S.; KAMEL, R. M.; EMARA, R. Z. Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. **Case Studies in Thermal Engineering**, [Amsterdam], v. 27, Oct. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21005281>. Acesso em: 29 nov. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Base de dados dos produtos banana**: Produção Brasileira. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2020.

Disponível em:

http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_xls/brasil/banana/banana_brasil_producao.htm. Acesso em: 27 set. 2021.

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], v. 57, n. 4, p. 701-717, Feb. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25751069/>. Acesso em: 23 dez. 2021.

FARHANINEJAD, Z. *et al.* Osmotic dehydration of banana slices using direct and indirect sonication: Optimization and microstructure analysis. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 40, n. 1, p. 1–10, Feb. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12336>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos**: Princípios e prática. 4. ed. Porto Alegre: Editora Artmed, 2019. p. 541-542.

FENG, Y. *et al.* Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 343, May 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814620322664>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FERNANDES, F. A. N. *et al.* Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 77, n. 1, p. 188–193, Nov. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087740500405X>. Acesso em: 12 maio 2021.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 41, n. 4, p. 604–610, May 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807001867>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 12, p. 37–41, Dec. 2008a. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802412256?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Dehydration of sapota (*Achras sapota* L.) using ultrasound as pretreatment. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 10, p. 1232–1237, Sept. 2008b. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802307118?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 82, n. 2, p. 261–267, Sept. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407001240>. Acesso em: 27 ago. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of genipap (*Genipa americana* L.). **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 8, n. 3, p. 1–8, July 2012. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/1556-3758.2480/html>. Acesso em: 20 set. 2019.

GANESAPILLAI, M.; REGUPATHI, I.; MURUGESAN, T. Modeling of thin layer drying of Banana (*Nendran* Spp) under microwave, convective and combined microwave-convective processes. **Chemical Product and Process Modeling**, [Germany], v. 6, n. 1, p. 1-27, Feb. 2011. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.2202/1934-2659.1479/pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

GARCIA-NOGUERA, J. *et al.* Dual-stage sugar substitution in strawberries with a Stevia-based sweetener. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 11, n. 1, p. 225–230, Jan. 2010. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/187/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

GERMER, S. P. M. *et al.* Process variables in the osmotic dehydration of sliced peaches. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. 4, p. 940–948, Oct./Dec. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/DGLXvCS9GXzbHPpxvVypwmb/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 16 jul. 2020.

HOLUB, I. *et al.* Novel findings on the metabolic effects of the low glycaemic carbohydrate isomaltulose (Palatinose). **British Journal of Nutrition**, [Cambridge], v. 103, n. 12, p. 1730–1737, June 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20211041/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

HUANG, D. *et al.* Application of infrared radiation in the drying of food products. **Trends in Food Science and Technology**, [London], v. 110, p. 765–777, Apr. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421001461>. Acesso em: 17 ago. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Prognóstico da produção agrícola, dos principais produtos, para safra 2021 - comparativos entre safras 2019/safra dezembro 2020**. IBGE, 2021. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/2415/epag_2020_dez.pdf. Acesso em: 27 ago. 2021.

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**, [Amsterdam], v. 82, p. 404–410, Sept. 2017a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643817302992>. Acesso em: 23 jul. 2018.

JUNQUEIRA, J. R. de J. *et al.* Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 41, p. 10–18, June 2017b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416305197>. Acesso em: 27 ago. 2021.

KADAM, D. M.; DHINGRA, D. Mass transfer kinetics of banana slices during osmo-convective drying. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 34, n. 2, p. 511–532, Apr. 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2009.00373.x>. Acesso em: 07 nov. 2021.

KAUR, K.; KUMAR, S.; ALAM, M. S. Air drying kinetics and quality characteristics of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) influenced by osmotic dehydration. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 16, n. 3, p. 214–222, Sept. 2014. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2831>. Acesso em: 27 ago. 2021.

KIM, H.-W. *et al.* Effect of isomaltulose used for osmotic extraction of *Prunus mume* fruit juice substituting sucrose. **Food Science and Biotechnology**, [New York], v. 27, n. 6, p. 1599–1605, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6233412/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

LANDIM, A. P. M.; BARBOSA, M. I. M. J.; BARBOSA JÚNIOR, J. L. Influence of osmotic dehydration on bioactive compounds, antioxidant capacity, color and texture of fruits and vegetables: A review. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 10, p. 1714–1722, Oct. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/8jWBtDCH5MW3FxxKQ7vPDkC/?lang=en>. Acesso em: 27 ago. 2021.

LINA, B. A. R.; JONKER, D.; KOZIANOWSKI, G. Isomaltulose (Palatinose): A review of biological and toxicological studies. **Food and Chemical Toxicology**, [Oxford], v. 40, n. 10, p. 1375–1381, Oct. 2002. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12387299/>. Acesso em: 20 ago. 2019.

LUCHESE, C. L.; GURAK, P. D.; MARCZAK, L. D. F. Osmotic dehydration of physalis (*Physalis peruviana* L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 63, n. 2, p. 1128–1136, Oct. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815003424>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MACEDO, L. L. *et al.* Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 43, n. 9, p. 1–10, Sept. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13451>. Acesso em: 12 out. 2020.

MACEDO, L. L. *et al.* Influence of yacon syrup concentration and drying air temperature on properties of osmotically pre-dehydrated dried banana. **Heat and Mass Transfer**, [Oxford], v. 57, n. 3, p. 441–451, Mar. 2021. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021HMT....57..441M/abstract>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 155, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821020715>. Acesso em: 22 out. 2021.

MAEDA, A. *et al.* Effects of the naturally-occurring disaccharides, palatinose and sucrose, on incretin secretion in healthy non-obese subjects. **Journal of Diabetes Investigation**, [Hoboken], v. 4, n. 3, p. 281–286, May 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4015665/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MAGALHÃES, M. L. *et al.* Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 215, p. 72–77, Dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417303254>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MALDONADO, R. R. *et al.* Application of soluble fibres in the osmotic dehydration of pineapples and reuse of effluent in a beverage fermented by water kefir. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 132, Oct. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643820308082>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MATHEW, N. S.; NEGI, P. S. Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of wild banana (*Musa acuminata* Colla): A review. **Journal of Ethnopharmacology**, [Ireland], v. 196, p. 124–140, Jan. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27988402/>. Acesso em: 24 ago. 2021.

MATSUURA, F. C. A. U.; DA COSTA, J. I. P.; FOLEGATTI, M. I. da S. Marketing de banana: Preferências do consumidor quanto aos atributos de qualidade dos frutos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 48–52, abr. 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbf/a/RJxLJvgX47yD3VnKZNz39Kz/?lang=pt>. Acesso em: 23 ago. 2021.

MEDEIROS, R. A. B. de *et al.* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 67, p. 167–173, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815303406>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MERCALI, G. D. *et al.* Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, *shum.*). **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 1, p. 82–91, Jan. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364381000229X>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MERCALI, G. D. *et al.* Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, *shum.*). **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 45, n. 11, p. 2281–2289, Nov. 2010. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2010.02418.x>. Acesso em: 27 ago. 2021.

MIANO, A. C.; ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. **Other mass transfer unit operations enhanced by ultrasound**. United States: Academic Press, 2017.

MIANO, A. C.; SABADOTI, V. D.; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 225, p. 53–61, May 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026087741830027X>. Acesso em: 22 mar. 2019.

MIERZWA, D.; KOWALSKI, S. J.; KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. **Food Technology and Biotechnology**, [Zagreb], v. 55, n. 2, p. 197–205, June 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5569343/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. Drying technology: Trends and applications in postharvest processing. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 3, p. 843–852, Apr. 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-010-0353-1>. Acesso em: 27 ago. 2021.

NOWACKA, M. *et al.* Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 144, p. 18–25, Feb. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814613007358>. Acesso em: 27 ago. 2021.

NOWACKA, M. *et al.* Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. **Food Control**, [Oxford], v. 93, p. 40–47, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713518302305>. Acesso em: 27 ago. 2021.

ODEWOLE, M. M.; OLANIYAN, A. M. Effect of osmotic dehydration pretreatments on drying rate and post-drying quality attributes of red bell pepper (*capsicum annuum*). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 18, n. 1, p. 226–236, Mar. 2016. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2922>. Acesso em: 26 maio 2021.

OKUNO, M. *et al.* Palatinose-blended sugar compared with sucrose: Different effects on insulin sensitivity after 12 weeks supplementation in sedentary adults. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, [Abingdon], v. 61, n. 6, p. 643–651, Sept. 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20367218/>. Acesso em: 29 ago. 2021.

OLIVEIRA, F. I. P. *et al.* Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 4, p. 610–615, May 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64136/1/2011_art_fipoliveira.pdf. Acesso em: 17 ago. 2020.

OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with *Stevia*-based sweetener. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 90, n. 4, p. 713–718, Oct. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000107>. Acesso em: 27 ago. 2021.

OLIVEIRA, I. M. *et al.* Modeling and optimization of osmotic dehydration of banana followed by air drying. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 29, n. 4, p. 400–413, Aug. 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1745-4530.2006.00067.x>. Acesso em: 27 ago. 2021.

OLIVEIRA, S. M.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Influence of drying processes and pretreatments on nutritional and bioactive characteristics of dried vegetables: A review. **Food Engineering Reviews**, [New York], v. 8, p. 134–163, May 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-015-9124-0>. Acesso em: 27 ago. 2021.

OSORIO, C. *et al.* Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 8, n. 3, p. 353–359, Sept. 2007. Disponível em: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300795167>. Acesso em: 27 ago. 2021.

OSTERMEIER, R. *et al.* Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 237, p. 110–117, May 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325200638_Influence_of_pulsed_electric_field_PEF_pre-treatment_on_the_convective_drying_kinetics_of_onions. Acesso em: 27 ago. 2021.

PAULA, R. L. de *et al.* Evaluation of the turmeric dye extraction residue in the formation of protective coating on fresh bananas (*Musa acuminata* cv. 'Maçã'). **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 55, n. 8, p. 3212–3220, Aug. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30065432/>. Acesso em: 18 out. 2020.

PEINADO, I. *et al.* Optical, mechanical and sensorial properties of strawberry spreadable products formulated with isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 2353–2364, Sept. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0970-y>. Acesso em: 18 ago. 2020.

PEREIRA, A.; MARASCHIN, M. Banana (*Musa spp*) from peel to pulp: Ethnopharmacology, source of bioactive compounds and its relevance for human health. **Journal of Ethnopharmacology**, [Ireland], v. 160, p. 149–163, Feb. 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25449450/>. Acesso em: 28 ago. 2020.

PICÓ, Y. Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. **Trends in Analytical Chemistry**, [Oxford], v. 43, p. 84-99, Feb. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016599361200369X>. Acesso em: 27 ago. 2021.

PORCIUNCULA, B. D. A. *et al.* Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (*Prata variety*) during osmotic dehydration and its use in predictive models. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 119, n. 3, p. 490-496, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877413003117>. Acesso em: 27 ago. 2021.

PRITHANI, R.; DASH, K. K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 64, Aug. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420303532>. Acesso em: 27 ago. 2021.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 80, p. 401-408, July 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643817301573>. Acesso em: 27 ago. 2021.

PUANGSUWAN, K. *et al.* Hybrid infrared with hot air drying of Pisang-Awak banana: Kinetics and shrinkage quality. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 44, n. 10, p. 1-10, Oct. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13827>. Acesso em: 22 jan. 2022.

RAMYA, V.; JAIN, N. K. A review on osmotic dehydration of fruits and vegetables: An integrated approach. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 40, n. 3, p. 1-22, June 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12440>. Acesso em: 27 ago. 2021.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K. Mass transfer during osmotic dehydration of banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 31, n. 4, p. 423-432, Mar. 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877496000866>. Acesso em: 17 ago. 2020.

RODRIGUES, S. *et al.* Ultrasound extraction of phenolics and anthocyanins from jaboticaba peel. **Industrial Crops & Products**, [Amsterdam], v. 69, p. 400-407, July 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669015001545>. Acesso em: 27 ago. 2021.

RUBIO-ARRAEZ, S. *et al.* Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 50, n. 9, p. 2046-2051, Sept. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijfs.12859>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SAGAR, V. R.; SURESH KUMAR, P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 47, n. 1, p. 15–26, Jan. 2010. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3550996/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SANT'ANA SILVA, A. *et al.* Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, [São Cristóvão], v. 9, n. 2, p. 107–115, dez. 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/500/50016937008.pdf>. Acesso em: 07 out. 2021.

SAWALE, P. D. *et al.* Isomaltulose (Palatinose) – An emerging carbohydrate. **Food Bioscience**, [Amsterdam], v. 18, p. 46–52, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429216301808>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SHARIF, I. *et al.* Microwave pretreatment and optimization of osmotic dehydration of wild blueberries using response surface methodology. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 269, p. 300–310, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814618310604>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SHI, X. *et al.* Effects of radiation temperature on dehydration and moisture migration in banana slices during far-infrared radiation drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 44, n. 11, p. 1–11, Nov. 2020. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14901>. Acesso em: 22 nov. 2021.

SHYAM, S.; RAMADAS, A.; CHANG, S. K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 48, p. 173–178, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464618303372>. Acesso em: 27 ago. 2021.

STOJANOVIC, J.; SILVA, J. L. Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 101, n. 3, p. 898–906, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814606001749>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SULISTYAWATI, I. *et al.* Osmotic dehydration of mango: Effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 98, p. 179–186, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306844>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SWASDISEVI, T. *et al.* Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 92, n. 1, p. 100–106, May 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877408005293>. Acesso em: 27 ago. 2021.

- TABTIANG, S.; PRACHAYAWARAKON, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 1, p. 20–28, Jan. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.613554>. Acesso em: 21 ago. 2019.
- TIROUTCHELVAME, D.; MARAN, J. P.; PRAGALYAASHREE, M. M. Response surface analysis and optimization of osmotic dehydration of *musa acuminata* slices. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, [Slovakia], v. 8, n. 4, p. 1016–1021, Mar./Feb. 2019. Disponível em: https://www.jmbfs.org/issue/february-march-2019-vol-8-no-4/jmbfs_761_tiroutchelvame/?issue_id=5293&article_id=8. Acesso em: 27 ago. 2021.
- TONOUCHI, H. *et al.* Studies on absorption and metabolism of palatinose (isomaltulose) in rats. **British Journal of Nutrition**, [Cambridge], v. 105, n. 1, p. 10–14, Jan. 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20807468/>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- TRAFFANO-SCHIFFO, M. V. *et al.* Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 236, p. 87–93, Dec. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28624093/>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- TYLEWICZ, U. *et al.* Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 213, p. 2–9, Nov. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417301838>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- VERMA, D.; KAUSHIK, N.; RAO, P. S. Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of Banana Slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 7, p. 1281–1297, May 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-013-1124-6>. Acesso em: 27 abr. 2020.
- WALISZEWSKI, K. N.; PARDIO, V. T.; OVANDO, S. L. Control of polyphenol oxidase activity in banana slices during osmotic dehydration. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 25, n. 2, p. 375–378, Feb. 2007. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930601120613>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 51, n. 9, p. 1654–1673, Sept. 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4152536/>. Acesso em: 27 ago. 2021.
- YU, Y. *et al.* Biochemical degradation and physical migration of polyphenolic compounds in osmotic dehydrated blueberries with pulsed electric field and thermal pretreatments. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 239, p. 1219–1225, Jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28873543/>. Acesso em: 12 jul. 2019.

ZHAO, Y.-Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 3, p. 352–362, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2018.1456449?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 27 ago. 2021.

ZOU, K. *et al.* Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 51, n. 1, p. 253–259, Apr. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643812004537>. Acesso em: 27 ago. 2021.

SEGUNDA PARTE**ARTIGO 1 - INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS NÃO-TÉRMICOS NA SECAGEM CONVECTIVA DE BANANA (*Musa Sapientum L.*, Prata variety): MODELAGEM MATEMÁTICA, CARACTERIZAÇÃO E REIDRATAÇÃO**

Fernanda Rezende Abrahão^{1*}; Jefferson Luiz Gomes Corrêa¹; Arlley de Brito Magalhães Sousa²; Paula Giarolla Silveira¹; Renata Nepomuceno da Cunha².

¹Departamento de Ciência dos Alimentos DCA-UFLA, 32700-900, Lavras, MG, Brasil.

²Departamento de Engenharia Química, UNIPAM, 38702-054, Patos de Minas, MG, Brasil.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência de três tratamentos na secagem convectiva de fatias de banana. Os experimentos de secagem foram realizados nas temperaturas de 60 e 70 °C, com a aplicação dos seguintes pré-tratamentos: banho ultrassônico (US) por 30 minutos; imersão em água destilada (25 °C) por 30 minutos (IM) e desidratação osmótica (OD). O processo osmótico foi constituído de imersão das amostras em isomaltulose (29.0 °Brix) por 60 minutos. Os modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem apresentaram bons ajustes. O modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou às cinéticas de secagem ($R^2 > 0.999$). O coeficiente de difusividade de Fick (D_{eff}) aumentou com o acréscimo da temperatura e foi maior para amostras submetidas a pré-tratamentos. O tratamento US resultou em menores tempos de secagem, com redução de até 22% do tempo. OD não foi eficiente na redução do tempo de secagem, resultando em amostras com a_w elevadas. IM resultou em reduzidos tempos de secagem, além de demandar menor gasto energético (107.570 kWh/kg). Amostras tratadas com US apresentaram menor encolhimento, tanto radial quanto longitudinal. O processo osmótico resultou em amostras com melhores parâmetros de cor. O tratamento IM seco a 60 °C apresentou melhor capacidade de reidratação.

Palavras-chave: Difusividade de água. Cinética de secagem. Energia ultrassônica. Desidratação osmótica.

1 INTRODUÇÃO

Produzida majoritariamente por países de clima tropical, a banana (*Musa spp.*) apresenta grande consumo, sendo caracterizada pelo seu elevado valor nutricional e sabor característico. É uma fruta rica em carboidratos, vitaminas, compostos bioativos e minerais, como potássio e magnésio. Apesar de sua grande aceitabilidade, a fruta é caracterizada pela sua alta susceptibilidade, oriunda da sua composição, o que dificulta seu armazenamento e manipulação por períodos mais extensos (GHIMIRE *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2019; SPERANÇA *et al.*, 2021). Desse modo, processos físicos e químicos podem ser aplicados visando o aumento da estabilidade da fruta, como processos de desidratação osmótica, liofilização e secagem, por diferentes métodos (FARHANINEJAD *et al.*, 2017).

A secagem é um dos métodos mais antigos para a extensão da vida útil de produtos agrícolas, afetando diretamente a sua qualidade. O processo consiste na remoção da umidade do produto até um nível em que as reações químicas e enzimáticas e o crescimento microbiano sejam minimizados (JAHANBAKHSI *et al.*, 2020). Porém, dentre as desvantagens do processo está a aplicação de temperaturas elevadas, o que pode resultar na degradação do alimento e alteração nas suas propriedades sensoriais e físico-químicas finais, como escurecimento e contração volumétrica. Após a secagem, especialmente em temperaturas mais elevadas, os alimentos podem apresentar encolhimento de suas dimensões em até 50% (CORRÊA *et al.*, 2012). Além disso, como o processo demanda o consumo de grande quantidade de energia, resulta em um significativo impacto econômico e ambiental (ROJAS; AUGUSTO, 2018).

Nesse sentido, a aplicação de tratamentos previamente aos processos de secagem representa uma alternativa para não só minimizar os danos resultantes, melhorando as características do produto final, como para reduzir o gasto energético. Alguns exemplos de pré-tratamentos comumente aplicados são: desidratação osmótica (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; DE MENDONÇA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, 2022), congelamento (JUNQUEIRA *et al.*, 2017), etanol (CORRÊA *et al.*, 2012; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020) e energia ultrassônica (AZOUBEL *et al.*, 2010; FERNANDES; RODRIGUES, 2012; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020).

A aplicação da energia ultrassônica visa melhorar não só a secagem convectiva, mas também aumentar a transferência de massa tanto na desidratação osmótica, hidratação e extração de compostos (MELLO *et al.*, 2021; RICCE *et al.*, 2016; ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020). Como pré-tratamento em processos de desidratação já foi aplicado em banana

(AZOUBEL *et al.*, 2010; FERNANDES; RODRIGUES, 2007), abóbora (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020), melão (DA SILVA *et al.*, 2016), mamão (SILVA JUNIOR *et al.*, 2018), abacaxi (CORRÊA, *et al.*, 2017; FERNANDES; RODRIGUES, 2008), entre outros. A técnica envolve a imersão do alimento, em pedaços, em água ou solução aquosa hipertônica, para a qual é aplicado a energia ultrassônica. A aplicação de pré-tratamento por ultrassom aumenta a difusividade efetiva da água no alimento e conduz à secagem mais rápida (AMAMI *et al.*, 2017; CORRÊA *et al.*, 2015; LA FUENTE; TADINI, 2018). O aumento da difusividade efetiva da água pode ser atribuído à formação de canais microscópicos por ondas ultrassônicas (MAGALHÃES *et al.*, 2017; MIANO; IBARZ; AUGUSTO, 2016; RICCE *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2016). Além disso, vale ressaltar que o tratamento ultrassônico não irá incorporar sólidos solúveis na amostra caso apenas água destilada seja utilizada como solvente (FERNANDES; RODRIGUES, 2012; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

A desidratação osmótica (OD) é um método que consiste na imersão do alimento em uma solução hipertônica, composta por sais e outros solutos, resultando na perda de água e incorporação de solutos pelo alimento (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021). É uma técnica com grande aplicação no desenvolvimento de novos produtos, pois promove o incremento do valor nutricional e funcional do alimento sem alterar significativamente a sua integridade (AZOUBEL *et al.*, 2015; CORRÊA *et al.*, 2010). Como pré-tratamento em processos de secagem, a OD pode resultar em maiores taxas de secagem e conseqüente redução nos tempos de secagem. A redução da exposição do alimento a altas temperaturas pode promover a melhoria na sua qualidade e aceitação (OSAE *et al.*, 2019). Ademais, a OD, em geral, é conduzida em temperatura ambiente e a diminuição do tempo de secagem contribui para a redução do consumo final de energia do processo, reduzindo o tempo gasto e temperatura utilizada (CORRÊA *et al.*, 2017; PRITHANI; DASH, 2020). Do ponto de vista tecnológico, o processo de OD pode ser uma alternativa de incorporação de solutos com importantes propriedades nutricionais, como a isomaltulose, que é um açúcar de digestão lenta, com reduzido índice glicêmico, com potencial prebiótico além de reconhecida propriedade não-cariogênica (SHYAM; RAMADAS; CHANG, 2018).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de três pré-tratamentos não-térmicos na secagem convectiva de banana da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety): imersão em água, desidratação osmótica e ultrassom. Para avaliação das cinéticas de secagem e propriedades finais dos produtos, duas temperaturas de secagem foram escolhidas. Diferentes modelos matemáticos foram aplicados para ajuste dos

dados e avaliação dos parâmetros de secagem. A caracterização das amostras foi realizada a partir da avaliação do encolhimento, coloração e sua habilidade de reidratação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

Bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) foram obtidas do mercado local da cidade de Patos de Minas, MG, Brasil. A seleção das frutas foi realizada com base na sua integridade e no grau de maturação através da coloração da casca pela escala de Von Loesecke (1950). Foram selecionadas bananas nos estádios 3 e 4 (aspecto verde/amareladas). As frutas foram caracterizadas quanto ao seu teor de sólidos solúveis, com o uso de um refratômetro, teor de umidade em estufa a vácuo a 70 °C (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC, 2010), atividade de água (Aqualab, 3-TE model, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA), pH e acidez titulável. Para a determinação da acidez titulável e do pH, 2.0 g de amostra foram triturados e homogeneizados com 50 mL de água deionizada. A leitura do pH foi realizada por um pHmêtro de bancada digital (Modelo DM-22, Digimed). Todas as análises foram realizadas em triplicata. Os resultados estão apresentados na Tabela 1. Isomaltulose comercial (palatinose) (Beneo, Mannheim, Alemanha) foi utilizada para o preparo da solução osmótica.

Tabela 1 - Caracterização da banana Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) fresca.

| Propriedade | Média ± Desvio Padrão |
|---|-----------------------|
| Umidade (kg H ₂ O/kg b.s.) | 2.633 ± 0.136 |
| Atividade de água | 0.934 ± 0.009 |
| Acidez titulável (g ácido málico/100 g) | 0.543 ± 0.112 |
| pH | 4.82 ± 0.08 |
| Sólidos Solúveis (°Brix) | 22.55 ± 0.98 |

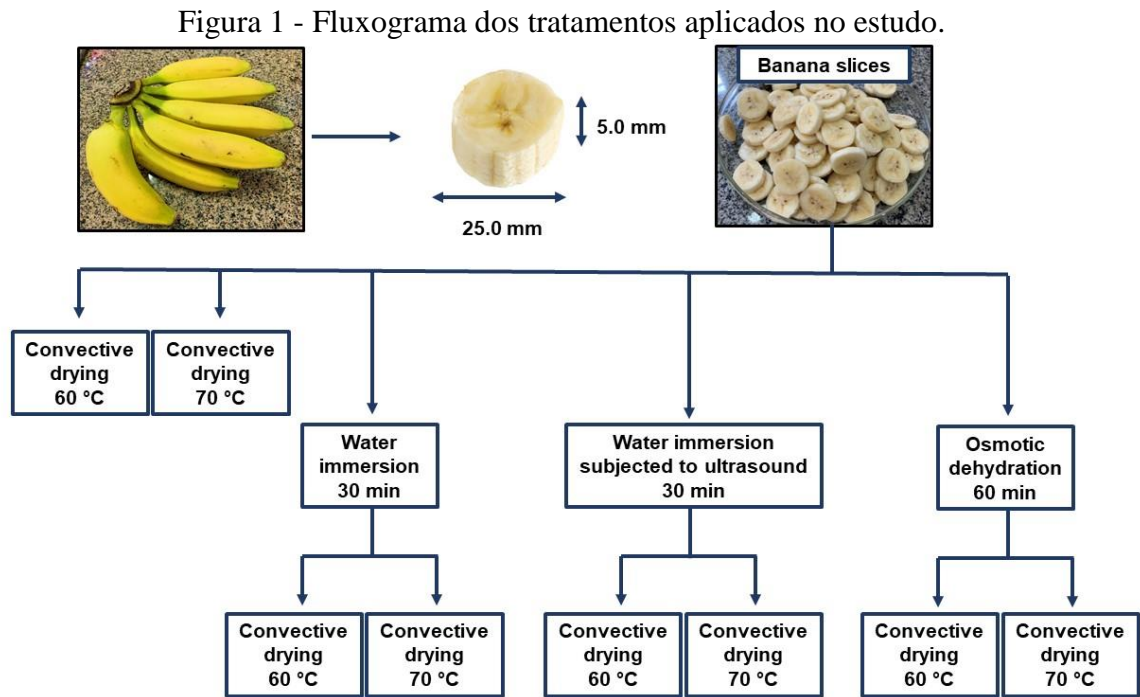
Média de três repetições ± desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

2.2 Preparação das amostras

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

Para buscar reduzir as variações, as amostras de banana de cada repetição pertenciam ao mesmo cacho. Os tratamentos aplicados às amostras bem como as condições de secagem estão apresentados na Figura 1 e serão explicados detalhadamente em seções posteriores.



Fonte: Da autora (2022).

2.3 Pré-tratamentos

Para o processamento das fatias de banana e avaliação da sua influência na secagem convectiva, três diferentes pré-tratamentos foram aplicados: imersão em água destilada (IM), imersão em água em banho ultrassônico (US) e desidratação osmótica (OD). Arranjo de amostras com 4 fatias de banana foram depositadas em béqueres com água deionizada ou solução de isomaltulose (40 g isomaltulose/100 g de água). A razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra foi de 4:1 (m/m) (AZOUBEL *et al.*, 2010; DA SILVA *et al.*, 2016; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2016; WIKTOR *et al.*, 2019).

Para o pré-tratamento de imersão em água, as amostras foram imersas em água deionizada, sob temperatura ambiente (22.0 ± 2 °C), sem agitação, em béqueres separados de maneira a evitar interferência entre as amostras. O período de imersão das amostras foi de 30 minutos, sendo tal valor determinado em estudos preliminares. Após o período de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água, pesadas e avaliadas quanto ao teor de umidade e sólidos solúveis.

No pré-tratamento ultrassônico, as amostras foram submetidas à energia ultrassônica em um banho ultrassônico (Modelo 03502, Quimis, São Paulo, Brasil) durante 30 minutos. O tempo de imersão foi determinado em estudos preliminares. As condições experimentais aplicadas foram: potência de 70 W, frequência de 40 kHz e temperatura de execução de 25.0 ± 3.0 °C. A potência volumétrica do ultrassom foi de 7.907 ± 0.658 W/L, determinada pelo método calorimétrico (LA FUENTE; TADINI, 2018). Após o tempo de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água, pesadas e avaliadas quanto ao teor de umidade e sólidos.

Para o processo de desidratação osmótica, as amostras foram imersas em soluções concentradas de isomaltulose (29.0 ± 0.6 °Brix) durante 60 minutos em temperatura ambiente (23.2 °C) e sem agitação. Após 60 minutos, as amostras foram removidas do processo osmótico, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de solução, pesadas e avaliadas quanto ao teor de umidade e sólidos solúveis. Previamente ao processo osmótico, a solução de isomaltulose foi caracterizada quanto a suas propriedades físico-químicas. A densidade foi mensurada por meio de um picnômetro em temperatura ambiente (25 °C) e a viscosidade foi avaliada por meio de viscosímetro rotativo (Modelo Q860A21, Quimis, São Paulo, Brasil) utilizando um sensor cilíndrico concêntrico. Foram obtidos os seguintes valores: pH de 7.55 ± 0.11 , densidade de 1110 kg/m³ e viscosidade de 3.1 ± 0.4 mPa.s.

A massa e o teor de umidade das amostras foram utilizados para calcular as variáveis respostas do experimento: perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG), conforme as equações 1 e 2 (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

$$WL(\%) = \frac{w_i \cdot x_i - w_f \cdot x_f}{w_i} \cdot 100 \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{w_f \cdot x_{sf} - w_i \cdot x_{si}}{w_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que w_i é a massa inicial da amostra (kg), x_i é o teor de umidade inicial da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), w_f é a massa final da amostra, x_f é o teor de umidade final da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), x_{sf} é o teor de sólidos totais final da amostra (kg sólido/kg) e x_{si} é o teor de sólidos totais inicial da amostra (kg/kg bs). Todos os experimentos foram realizados em triplicata e os valores apresentados são baseados nas médias encontradas.

2.4 Secagem convectiva

A secagem convectiva das amostras foi executada em um secador de bandejas (Modelo PEG60, Pardal, Petrópolis, Brasil) com circulação de ar forçada com velocidade de 1.1 ± 0.3 m/s, nas temperaturas de 60 e 70 °C. Após a realização dos pré-tratamentos, as amostras foram dispostas em bandejas perfuradas. Para manter a condição de ar constante, apenas uma bandeja foi usada com uma única camada de amostra (aproximadamente 200 g) em cada secagem. As bandejas contendo as amostras foram pesadas em intervalos de 5 minutos durante a primeira hora, 10 minutos até a quarta hora de secagem e depois em intervalos de 20 minutos até o equilíbrio dinâmico (peso constante).

O teor de umidade das amostras durante o processo de secagem foi determinado gravimetricamente a partir do teor de umidade inicial da amostra (antes do processo de secagem). O peso da amostra foi medido em balança semianalítica (Modelo DG-15, Digimed, Brasil). A cinética de secagem foi estudada observando-se as curvas de secagem para cada temperatura considerada. Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata. Durante o processo de secagem, a umidade relativa do ar de secagem e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas com o auxílio de um higrômetro digital, obtendo-se os valores de $43.20 \pm 5.87\%$ e $41.45 \pm 3.67\%$, respectivamente.

2.4.1 Modelagem matemática

Os dados experimentais obtidos nos experimentos de secagem foram ajustados utilizando seis diferentes equações de secagem em camada delgada (TABELA 2). A razão de umidade (MR) das amostras durante os experimentos foi calculada usando a Eq. 3:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (3)$$

em que X_t , X_o e X_{eq} representam o teor de umidade durante a secagem, teor de umidade inicial e teor de umidade de equilíbrio (kg H₂O/kg d.b.), respectivamente (JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 2 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada.

| Modelo | Equação | Referência |
|------------------------------|--|---|
| Henderson & Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | Henderson e Pabis (1961) |
| Logarítmico | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ | Akpinar, Bicer e Yildiz (2003) |
| Midilli | $MR = -\exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ | Abbaspour-Gilandeh, Kaveh e Jahanbakhshi (2019) |
| Newton | $MR = \exp(-k \cdot t)$ | Lewis (1921) |
| Page | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$ | Page (1949) |
| Wang & Singh | $MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$ | Wang e Singh (1978) |

Em que: MR é a razão de umidade (adimensional), t é o tempo de secagem (min), a, b, n e k são constantes empíricas e coeficientes nas equações de secagem.

Fonte: Da autora (2022).

2.4.2 Difusividade efetiva

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de difusão unidirecional para estimar a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A segunda lei de Fick para a difusão unidirecional foi aplicada (Eq. 4).

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot (D_{eff} \cdot \frac{\partial X_t}{\partial z}) \quad (4)$$

Em que X é a umidade (kg H₂O/kg d.b.) no tempo t, D_{eff} é a difusividade efetiva (m² s⁻¹), z é uma coordenada geral (m) e t é a denotação de tempo (s). Considerando o formato e dimensão das fatias de banana, é possível assumir que não haverá difusão nas direções angular e radial e, assim, a amostra pode ser considerada como uma placa de espessura 2L. Para tal geometria, o valor de D_{eff} pode ser determinado conforme a Eq. 5.

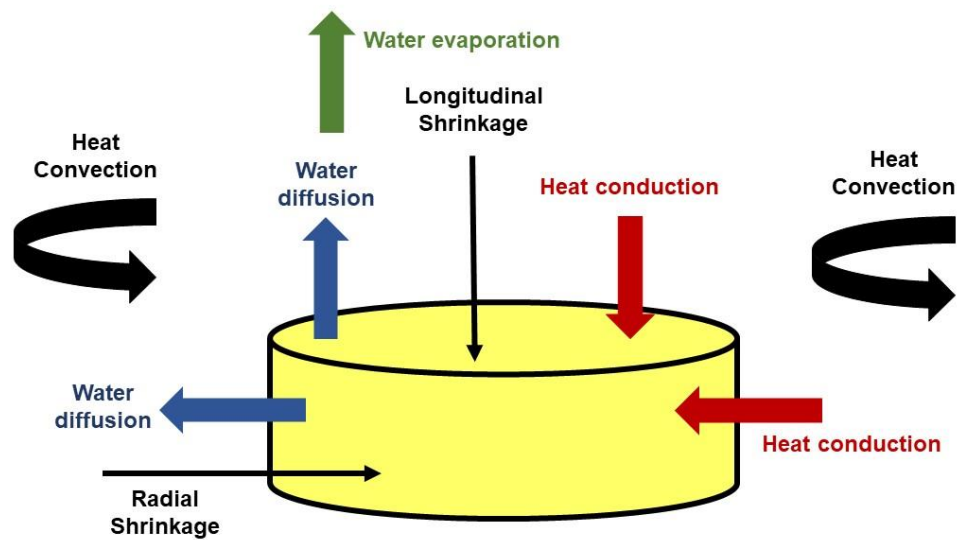
$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} 1/(2i + 1)^2 \cdot \exp(-(2i + 1)^2 \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}) \right) \quad (5)$$

Em que MR é o conteúdo de água adimensional e L é o comprimento característico (metade da espessura) (m). A condição inicial é uma quantidade inicial uniforme de água ou sólido, X(z, 0) = X₀. As condições de contorno são a simetria de concentração, $\frac{\partial X_t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$, e

o conteúdo de equilíbrio na superfície $X_{(L,t)} = X_{eq}$ (CORRÊA *et al.*, 2012; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

O encolhimento tem grande influência na taxa de secagem de um alimento, modificando significativamente o seu coeficiente de difusão (CORRÊA *et al.*, 2012; SEYEDABADI; KHOJASTEHPUR; ABBASPOUR-FARD, 2017). Ademais, a secagem inclui diversos fenômenos de transferência de calor e massa, e mudanças estruturais podem influenciar esses fenômenos, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Fenômenos de transferência de calor e massa que ocorrem simultaneamente durante a secagem convectiva de fatias de banana.



Fonte: Da autora (2022).

De forma a avaliar a influência do encolhimento no cálculo de difusividade, comparando com o processo com encolhimento negligenciável, a Eq. 4 e a Eq. 5 foram resolvidas considerando a variação de L (m) ao longo do tempo de secagem. A forma mais simples de avaliar o encolhimento no modelo difusional de Fick é a obtenção de uma equação que relaciona a variação da espessura com o teor de umidade. Tal equação pode ser obtida considerando uma dependência linear do encolhimento volumétrico com o teor de umidade das amostras (CORRÊA *et al.*, 2012), conforme a Eq. 6:

$$\frac{V}{V_0} = a + b \cdot \frac{X}{X_0} \quad (6)$$

em que V é o volume da amostra, X é o teor de umidade (d.b.), a e b são os parâmetros de ajuste da equação. O subscrito 0 está relacionado com a condição inicial. Além disto, a dependência

linear do encolhimento volumétrico só é possível se o encolhimento longitudinal e o radial também apresentarem dependência linear com a umidade. Desse modo, foram assumidas a Eq. 7 e a Eq. 8 (CORRÊA *et al.*, 2012).

$$\frac{l}{l_0} = a + b \cdot \frac{X}{X_0} \quad (7)$$

$$\frac{d}{d_0^2} = a + b \cdot \frac{X}{X_0} \quad (8)$$

Em que l e d são a espessura e o diâmetros das fatias de banana, respectivamente.

A Eq. 5 foi resolvida numericamente, considerando 5 termos ($i = 5$) para a obtenção dos valores de difusividade efetiva (D_{eff}). Foi usado o *software* Statistica 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA). Para o cálculo de D_{eff} avaliando a influência do encolhimento, adotou-se a estimativa não linear considerando 3 variáveis (MR, t e L), sendo L obtido analiticamente a partir da dependência linear do encolhimento com o conteúdo de umidade (Eq. 7).

2.5 Estimativa do consumo energético

O total de energia consumido (TEC) durante o processo de secagem (incluindo os pré-tratamentos) foi estimado conforme a Eq. 9 considerando a quantidade de amostra fresca inicial (em kg) (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020).

$$TEC = \frac{E_{US} + E_D}{w_p} \quad (9)$$

Em que w_p é a quantidade de amostra fresca, E_{US} representa a estimativa do consumo energético durante o pré-tratamento com ultrassom (Eq. 10) e E_D representa a estimativa do consumo de energia durante a secagem convectiva (Eq. 11).

$$E_{US} = \frac{W \cdot V \cdot t}{w_p} \quad (10)$$

Em que W é a potência volumétrica do ultrassom (W/L), calculada conforme La Fuente e Tadini (2018), V é o volume de água (L) utilizado no banho ultrassônico e t é o tempo gasto no pré-tratamento (20 minutos).

$$E_D = \frac{A \cdot v \cdot \rho_a \cdot C_p \Delta T \cdot t_d}{w_p} \quad (11)$$

A representa a área transversal de secagem (m²), v a velocidade do ar de secagem (m/s), ρ_a é a densidade do ar, Cp o calor específico do ar em temperatura ambiente (25 °C) (KJ/kg.K), ΔT a diferença de temperatura entre o ar ambiente e o ar de secagem e t_d é o tempo de secagem gasto para as amostras atingirem um teor de umidade de 25% w.b.

2.6 Encolhimento volumétrico

O volume (V) das amostras foi calculado a partir da espessura (l) e da média de três medidas do diâmetro (d) das amostras nos respectivos eixos coordenados com o auxílio de um paquímetro digital calibrado (MTX – 510289, Matrix, Brasil). Três amostras foram avaliadas para cada tratamento durante a secagem. A contração volumétrica foi avaliada nas direções radial (SR) e longitudinal (SL), Eq. 12 e Eq. 13, respectivamente, considerando o início e o final do processo de secagem (CORRÊA *et al.*, 2012):

$$SR = \frac{d_0 - d}{d_0} \quad (12)$$

$$SL = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (13)$$

O coeficiente de encolhimento (SC) também foi determinado, conforme a Eq. 14 (CORRÊA *et al.*, 2012). Tal coeficiente indica o quanto a amostra teve seu volume reduzido ao longo da secagem. Para a determinação do volume, as amostras foram consideradas como um disco. O diâmetro e a espessura das amostras foram avaliados a partir de um paquímetro digital calibrado.

$$SC = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (14)$$

O encolhimento isotrópico (SI) foi obtido a partir da relação entre o encolhimento radial e o encolhimento longitudinal, conforme apresentado na Eq. 15.

$$SI = \frac{SR}{SL} \quad (15)$$

2.7 Caracterização físico-química

2.7.1 Teor de umidade e atividade de água (a_w)

O teor de umidade das amostras secas foi determinado gravimetricamente em estufa a vácuo a 70 °C até peso constante (AOAC, 2010). A determinação da atividade de água foi realizada em um higrômetro (Aqualab, modelo 3-TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA). As análises foram realizadas em triplicata.

2.7.2 Acidez titulável e pH

Para a determinação da acidez titulável e leitura do pH, 2.0 g de amostra foram triturados e homogeneizados com 50 mL de água deionizada. Na determinação da acidez titulável, três gotas de fenolftaleína foram adicionadas e as amostras foram tituladas com solução de hidróxido de sódio 0.1N. Os resultados foram expressos em percentagem (g de ácido málico em 100 g de amostra) (MACEDO *et al.*, 2020). A leitura do pH foi realizada por um pHmêtro de bancada digital (Modelo DM-22, Digimed). Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

2.7.3 Análise colorimétrica

A coloração da superfície das amostras secas foi analisada a partir de um colorímetro digital (Minolta, Modelo CR-400, Osaka, Japão). As medidas foram realizadas em diferentes posições de cada amostra. O sistema de coordenadas CIELAB (L^* , a^* e b^*) foi mensurado com iluminante D65, onde L^* expressa a claridade (100 para branco a 0 para preto), a^* indica vermelho quando positivo e verde quando negativo, b^* indica amarelo quando positivo e azul quando negativo. (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Os valores do Chroma (C^*) e tonalidade (H°) foram calculados de acordo com a Eq. 16 e a Eq. 17, respectivamente.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (16)$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (17)$$

2.8 Capacidade de reidratação

A avaliação da capacidade de absorção de água das amostras secas foi determinada por meio da capacidade de reidratação (RC). As amostras secas (aproximadamente 1 g) foram imersas em 150 mL de água deionizada a 25 ± 2 °C. Em intervalos de tempo pré-determinados, as amostras eram removidas da água, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água e pesadas. A variação da massa das amostras foi utilizada para a avaliação do processo de reidratação, conforme a Eq. 18 (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Todos os testes foram realizados em quadruplicata e os valores médios foram utilizados para os cálculos.

$$RC = \frac{\text{massa das amostras reidratadas}}{\text{massa das amostras secas}} \quad (18)$$

2.9 Análise estatística

Os parâmetros e constantes das equações empíricas foram estimados, correlacionando-se os modelos matemáticos aos dados experimentais, com o uso da regressão não linear pelo método Quase-Newton ao nível de 5% de significância, pelo *software* Statistica 7.0® (StatSoft Inc., Tulsa, OK). A avaliação dos modelos aplicados foi baseada no maior coeficiente de determinação (R^2) e no menor valor do desvio médio relativo (E%) (Eq. 19), em que m_i é o valor experimental, m_p é o valor previsto e N é o tamanho da amostra. Outros parâmetros estatísticos, como a soma do erro quadrático (SSE) (Eq. 20) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (Eq. 21), também foram utilizados para avaliar e comparar a qualidade do ajuste.

$$E (\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad (19)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \quad (20)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \right]^{1/2} \quad (21)$$

Para a avaliação dos resultados das análises qualitativas, aplicou-se ANOVA, seguida do teste de Tukey, ambos considerando um nível de significância de 5%. Assim, como demais análises estatísticas, foi utilizado o *software* Statistica 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos pré-tratamentos

O efeito dos pré-tratamentos não-térmicos aplicados na perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e umidade final (X) das amostras está apresentado na Tabela 3. Durante os pré-tratamentos de imersão em água (IM) e banho ultrassônico (US), as amostras perderam sólidos e ganharam água. Tal resultado é devido ao gradiente de concentração, que favorece o transporte de sólidos da fruta para a água e a transferência de água do meio para a fruta. Como consequência de tal comportamento, o teor de umidade final das amostras aumentou em 57.50% e 35.32% com a aplicação de US e IM, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos (AZOUBEL *et al.*, 2010, 2015; DA SILVA *et al.*, 2016; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; WANG *et al.*, 2018).

Tabela 3 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação de pré-tratamentos.

| Tratamento | WL (%) | SG (%) | X (kg H ₂ O/kg d.b.) |
|------------|-----------------|----------------|---------------------------------|
| IM 30 min | -19.699 ± 0.178 | -1.369 ± 0.050 | 3.563 ± 0.068 |
| US 30 min | -17.517 ± 1.346 | -2.974 ± 0.317 | 4.147 ± 0.237 |
| OD 60 min | 5.155 ± 0.922 | 4.068 ± 0.922 | 2.377 ± 0.106 |

Média de três repetições ± desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

O uso de energia ultrassônica foi efetivo na retirada de solutos da fruta quando comparado ao tratamento com apenas imersão em água. Tal resultado é importante, pois demonstra que a tecnologia ultrassônica pode ser utilizada para a remoção de açúcares e sólidos nativos de diversas frutas, podendo ser aplicada na produção de alimentos com baixo teor calórico (AZOUBEL *et al.*, 2015). Durante a aplicação de ultrassom, as amostras são submetidas em um ciclo de alternância de compressão e expansão, que pode resultar na formação de microcanais, resultando na perda de água e solutos das fatias da fruta para o meio líquido (AZOUBEL *et al.*, 2015; FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2008).

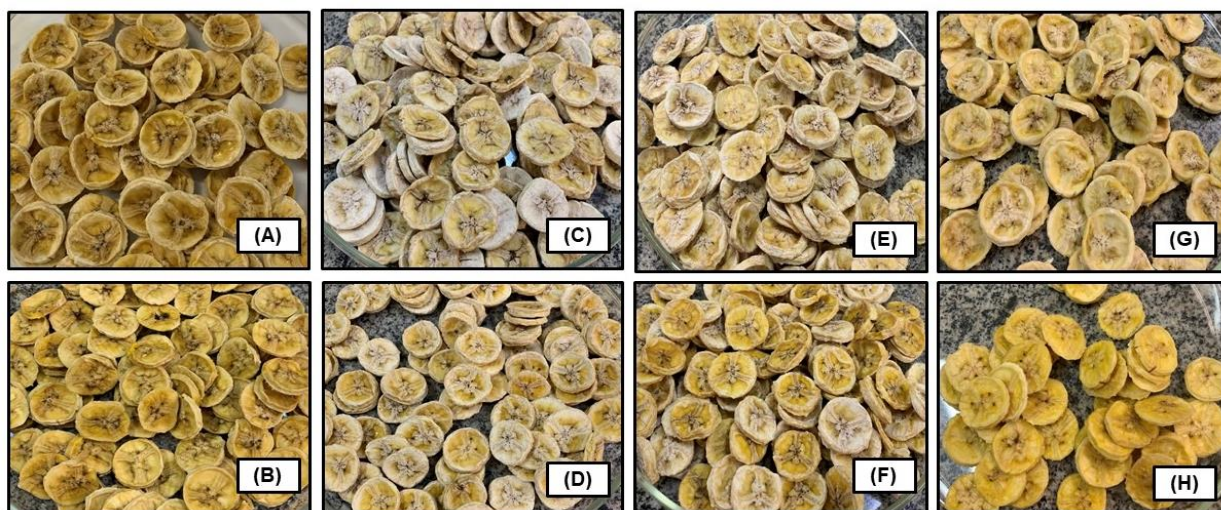
O uso de isomaltulose no processo de desidratação osmótica resultou em ganho de sólidos pela fruta e perda de água da fruta para o meio. A perda de água pelas fatias de banana já era esperada, uma vez que a aplicação de soluções hipertônicas resulta em um alto gradiente

de concentração, aumentando os processos de transferência de massa. Também foi observado que o percentual de perda de água foi maior que o de ganho de solutos. Tal comportamento é decorrente da seletividade da membrana celular, que permite o transporte de pequenas moléculas, como a água, mas restringe o transporte de moléculas maiores, como a da isomaltulose (DA SILVA *et al.*, 2016).

Durante o processo osmótico, algumas variáveis podem interferir no ganho de solutos e perda de água pelas amostras, como o tempo de processo e a concentração da solução osmótica. Tradicionalmente, condições otimizadas de processo envolvem condições que resultem em maior perda de água e menor ganho de sólidos. Do ponto de vista nutricional e sensorial, uma menor captação de sólidos na desidratação osmótica é interessante (DA SILVA *et al.*, 2016). Além disso, como o processo osmótico não demanda a utilização de altas temperaturas nem equipamentos específicos, pode representar uma interessante alternativa de impregnação de solutos de baixo valor calórico, como a isomaltulose, em frutas e vegetais.

3.2 Secagem convectiva

Figura 3 - Bananas secas (*Musa Sapientum* L., Prata variety) sob diferentes condições de estudo.



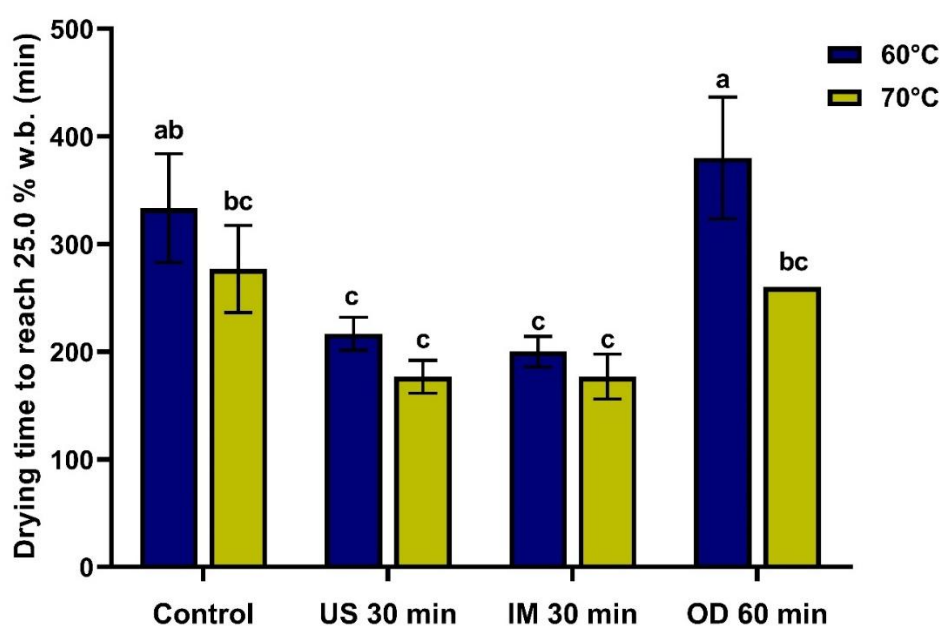
Onde: (A) secagem 60 °C sem pré-tratamento, (B) secagem 70 °C sem pré-tratamento, (C) US, 60 °C, (D) US, 70 °C, (E) IM, 60 °C, (F) IM, 70 °C, (G) OD, 60 °C e (H) OD, 70 °C.

Fonte: Da autora (2022).

As amostras das bananas secas submetidas ou não a pré-tratamentos não-térmicos estão apresentadas na Figura 3. Os tempos médios de secagem que amostras demoraram para atingir um teor de umidade de 25% (w.b.) estão apresentados na Figura 4. É possível observar que, de maneira geral, a aplicação de pré-tratamentos acelerou o processo de secagem das amostras quando comparado ao controle. Além disso, secagens com temperatura do ar em 70 °C

apresentaram tempos de processo reduzidos. Temperaturas elevadas no processo de secagem fornecem uma maior energia para superar o calor latente da mudança de fase decorrente da evaporação de umidade. Além disto, a resistência interna ao transporte de umidade diminui à medida em que a temperatura de secagem aumenta, devido à maior mobilidade das moléculas de água no interior do alimento, enquanto que a resistência externa diminui devido ao aumento do gradiente de pressão da água entre as fases (CORRÊA *et al.*, 2017).

Figura 4 - Tempo médio de secagem para atingir 25% de umidade (base úmida) de bananas (*Musa Sapientum* L., Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.



Mesma letra sobre as colunas indica que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Comparadas com as amostras controle, bananas tratadas com ultrassom tiveram seus tempos médios de secagem reduzidos em 15.39% e 22%, para as temperaturas de 60 °C e 70 °C, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados em cenouras (WANG *et al.*, 2018), mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015), gengibre (OSAE *et al.*, 2019) e bananas (FERNANDES; RODRIGUES, 2007). A energia ultrassônica, ao penetrar na amostra, afeta a microestrutura celular, promovendo desintegração, facilitando a difusão da água durante o processo de secagem (OSAE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2018).

Interessante resultado foi observado quando o pré-tratamento de imersão (IM) foi associado à secagem convectiva a 70 °C. Reduzido tempo de secagem foi obtido, estatisticamente semelhante ao tempo das amostras tratadas por ultrassom. Comparadas com as

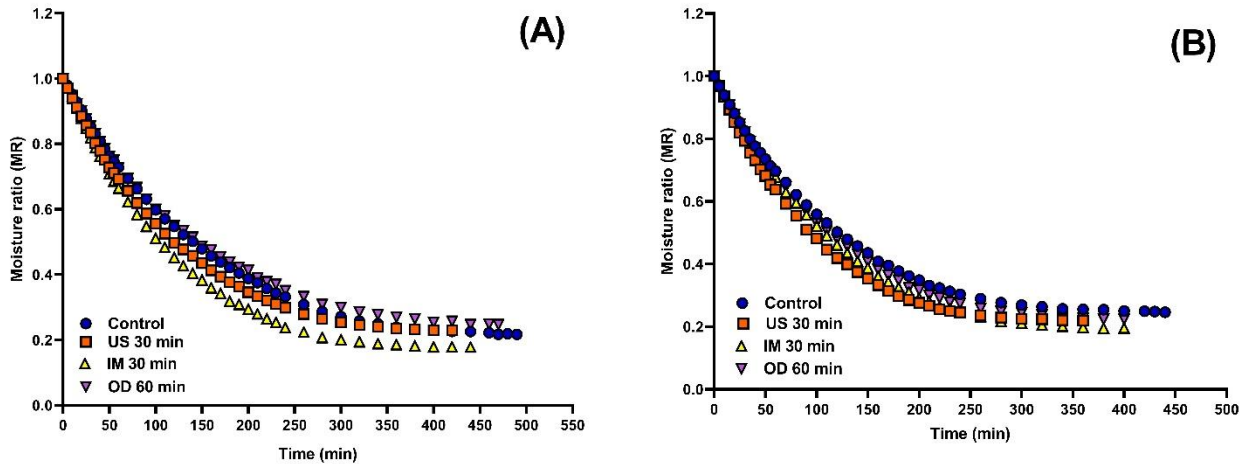
amostras controle, bananas tratadas por imersão em água tiveram seus tempos de secagem reduzidos em 39% e 36%, para as temperaturas de 60 °C e 70 °C, respectivamente. Quando as fatias de bananas são imersas em água destilada por um determinado período de tempo, um gradiente de concentração é estabelecido, promovendo a perda de sólidos nativos da fruta (DA SILVA *et al.*, 2016). Como consequência, a estrutura celular é comprometida, aumentando a difusão de água no processo de secagem posterior. Ademais, mesmo promovendo baixo percentual de ganho de água, o processo de imersão não demanda equipamento específico, além de ser realizado em temperatura ambiente, sendo uma opção econômica de tratamento para frutas secas.

Como pode ser observado, o uso de OD como pré-tratamento na secagem convectiva de bananas não resultou em tempos médios de secagem reduzidos quando comparado com as amostras controle, em ambas temperaturas de secagem. Tal resultado pode ser decorrente da formação de uma camada de soluto na superfície da fruta após o processo osmótico, que pode ter dificultado o fluxo de água, reduzindo a difusividade e aumentando, conseqüentemente, o tempo de secagem (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017). Resultado semelhante foi observado em pimentão (ODEWOLE; OLANIYAN, 2016), cenoura (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017), banana (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012), morango (MACEDO *et al.*, 2022) e mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015).

3.2.1 Cinética de secagem e modelagem matemática

De forma a avaliar a influência dos diferentes pré-tratamentos na secagem convectiva da banana, o teor de umidade adimensional (MR) foi calculado até o ponto de equilíbrio dinâmico, e sua variação ao longo do processo de secagem é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Evolução do teor de umidade durante a secagem convectiva de bananas (*Musa Sapientum* L., Prata variety) a 60 °C (A) e 70 °C (B) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.

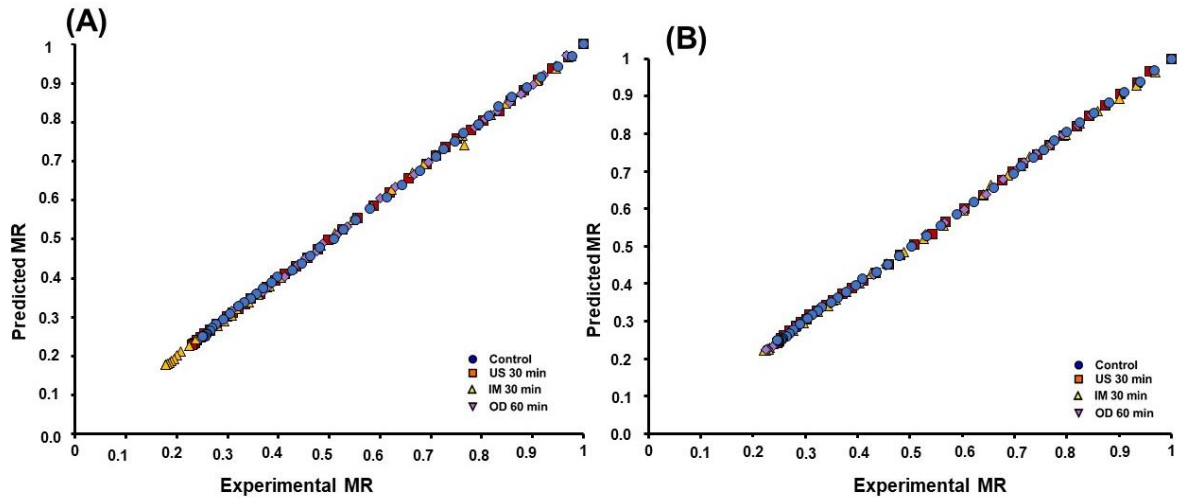


Fonte: Da autora (2022).

Como esperado, o teor de umidade das amostras diminuiu com o tempo de secagem, apresentando um decaimento exponencial. No estágio inicial, o processo é controlado principalmente pelo mecanismo de difusão, com a razão de umidade caindo rapidamente, até que, gradualmente, o teor de umidade de equilíbrio seja atingido (CORRÊA *et al.*, 2012; KHAWAS *et al.*, 2015).

Os parâmetros de ajustes, constantes e critérios de comparação estão apresentados na Tabela 4. Todos os modelos matemáticos aplicados aos dados experimentais apresentaram bom ajuste, obtendo valores elevados de R^2 , variando de 0.970 a 0.999. A escolha da equação matemática com melhor ajuste foi baseada em maiores valores de R^2 e menores valores de SSE, E (%) e RMSE. Portanto, dentre as equações para secagem em camada delgada testadas, as equações logarítmica e de Midilli melhor representaram o processo de secagem de fatias de banana, com valores altos de R^2 (0.999) e baixos valores de SSE, E (%) e RMSE (< 0.037) para todos os tratamentos. Além disto, o bom ajuste do modelo de Midilli também pode ser observado pela distribuição dos valores de MR preditos com os valores de MR experimentais (FIGURA 6), em que os dados estão agrupados em torno de uma linha reta com inclinação próxima de 45°. Resultado semelhante foi observado em estudos com banana maduras (MACEDO *et al.*, 2020) e bananas verdes secas (LA FUENTE; TADINI, 2018), em que a aplicação do modelo de Midilli melhor representou o processo em todas as temperaturas de secagem testadas.

Figura 6 - Comparação dos valores de razão de umidade (MR) experimental e predito de acordo com a equação de Midilli para a secagem de fatias de banana (*Musa Sapientum* L., Prata variety) a 60 °C (A) e 70 °C (B).



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana (*Musa Sapientum* L., Prata variety) (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R ² | E (%) | SSE | RMSE |
|------------------------|--|----------------|-------|----------------------|-------|
| Controle, 60 °C | | | | | |
| Page | k = 0.014; n = 0.791 | 0.994 | 1.095 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.026 |
| Newton | k = 0.005 | 0.981 | 3.099 | 0.0022 | 0.047 |
| Logarítmico | a = 0.795; b = 0.210; k = 0.008 | 0.999 | 0.026 | 5 x 10 ⁻⁵ | 0.007 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 7 × 10 ⁻⁶ | 0.993 | 0.565 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.027 |
| Henderson & Pabis | a = 0.944; k = 0.004 | 0.986 | 2.679 | 0.002 | 0.040 |
| Midilli | k = 0.007; n = 0.989; b = 4 × 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.023 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| Controle, 70 °C | | | | | |
| Page | k = 0.017; n = 0.761 | 0.991 | 1.337 | 0.001 | 0.032 |
| Newton | k = 0.005 | 0.972 | 4.349 | 0.003 | 0.057 |
| Logarítmico | a = 0.792; b = 0.216; k = 0.009 | 0.999 | 0.029 | 1 x 10 ⁻⁴ | 0.008 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 7×10 ⁻⁶ | 0.990 | 0.621 | 0.001 | 0.033 |
| Henderson & Pabis | a = 0.932; k = 0.005 | 0.979 | 3.497 | 0.002 | 0.049 |
| Midilli | k = 0.007; n = 0.996; b = 4 × 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.033 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.003 |

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana (*Musa Sapientum* L., Prata variety) (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|-------------|
| US 30 min, 60 °C | | | | | |
| Page | k = 0.014; n = 0.812 | 0.995 | 1.211 | 5 x 10 ⁻⁴ | 0.022 |
| Newton | k = 0.005 | 0.985 | 3.418 | 0.002 | 0.042 |
| Logarítmico | a = 0.817; b = 0.187; k = 0.008 | 0.999 | 0.005 | 1.9x0 ⁻⁵ | 0.004 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 8 x 10 ⁻⁶ | 0.994 | 0.576 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.027 |
| Henderson & Pabis | a = 0.949; k = 0.005 | 0.989 | 2.905 | 0.001 | 0.036 |
| Midilli | k = 0.007; n = 0.986; b = 4 x 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.002 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.003 |
| US 30 min, 70 °C | | | | | |
| Page | k = 0.015; n = 0.809 | 0.994 | 1.039 | 6 x 10 ⁻⁴ | 0.025 |
| Newton | k = 0.006 | 0.984 | 3.027 | 0.002 | 0.043 |
| Logarítmico | a = 0.808; b = 0.196; k = 0.009 | 0.999 | 0.031 | 1 x 10 ⁻⁴ | 0.008 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 9 x 10 ⁻⁶ | 0.995 | 0.522 | 6 x 10 ⁻⁴ | 0.025 |
| Henderson & Pabis | a = 0.947; k = 0.005 | 0.988 | 2.577 | 0.001 | 0.037 |
| Midilli | k = 0.007; n = 1.004; b = 4 x 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.085 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |
| IM 30 min, 60 °C | | | | | |
| Page | k = 0.013; n = 0.853 | 0.995 | 2.463 | 8 x 10 ⁻⁴ | 0.027 |
| Newton | k = 0.006 | 0.989 | 5.937 | 0.002 | 0.039 |
| Logarítmico | a = 0.876; b = 0.142; k = 0.009 | 0.999 | 0.007 | 1 x 10 ⁻⁴ | 0.008 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 8 x 10 ⁻⁶ | 0.992 | 0.240 | 0.001 | 0.033 |
| Henderson & Pabis | a = 0.966; k = 0.006 | 0.990 | 5.154 | 0.001 | 0.037 |
| Midilli | k = 0.006; n = 1.034; b = 3 x 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.015 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| IM 30 min, 70 °C | | | | | |
| Page | k = 0.016; n = 0.813 | 0.994 | 1.482 | 0.001 | 0.027 |
| Newton | k = 0.006 | 0.984 | 4.263 | 0.002 | 0.045 |
| Logarítmico | a = 0.829; b = 0.183; k = 0.010 | 0.999 | 0.019 | 6 x 10 ⁻⁵ | 0.008 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 11 x 10 ⁻⁵ | 0.992 | 0.454 | 0.001 | 0.032 |
| Henderson & Pabis | a = 0.950 k = 0.006 | 0.987 | 3.527 | 0.002 | 0.039 |
| Midilli | k = 0.008; n = 1.014; b = 5 x 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.003 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana (*Musa Sapientum* L., Prata variety) (Conclusão).

| Modelo | Parâmetros | R ² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------------|--|----------------|-------|----------------------|-------|
| OD 60 min, 60 °C | | | | | |
| Page | k = 0.013; n = 0.788 | 0.995 | 1.070 | 0.001 | 0.023 |
| Newton | k = 0.004 | 0.981 | 3.082 | 0.002 | 0.046 |
| Logarítmico | a = 0.793; b = 0.208; k = 0.007 | 0.999 | 0.015 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| Wang & Singh | a = - 0.004; b = 6 × 10 ⁻⁶ | 0.992 | 0.683 | 0.001 | 0.029 |
| Henderson & Pabis | a = 0.942 k = 0.004 | 0.987 | 2.669 | 0.002 | 0.039 |
| Midilli | k = 0.006; n = 0.969; b = 4 × 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.006 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |
| OD 60 min, 70 °C | | | | | |
| Page | k = 0.014; n = 0.823 | 0.994 | 1.356 | 0.001 | 0.026 |
| Newton | k = 0.006 | 0.986 | 3.749 | 0.002 | 0.042 |
| Logarítmico | a = 0.829; b = 0.179; k = 0.009 | 0.999 | 0.020 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.008 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 9 × 10 ⁻⁶ | 0.994 | 0.462 | 0.001 | 0.027 |
| Henderson & Pabis | a = 0.953 k = 0.005 | 0.989 | 3.173 | 0.001 | 0.037 |
| Midilli | k = 0.007; n = 1.018; b = 4 × 10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.057 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |

Em que: a, b, n são os parâmetros e k a constante dos modelos matemáticos.

Fonte: Da autora (2022).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de ajuste da Eq. 7 e da Eq. 8, que indicam a dependência linear entre o encolhimento volumétrico e o teor de umidade das amostras. Com base nessa relação é possível obter os valores de difusividade efetiva considerando a contração volumétrica (TABELA 6), que apresentam grande influência nas curvas de cinética de secagem. Pelos valores de R² da Tabela 5, vê-se que a consideração do encolhimento linear é satisfatória para a estimativa do encolhimento de fatias de banana em secagem convectiva.

Tabela 5 - Parâmetros de ajuste das equações (Eq. 7 e Eq. 8) de dependência linear entre o encolhimento volumétrico e o teor de umidade na secagem convectiva de bananas (*Musa Sapientum* L., Prata variety) sob diferentes condições.

| Tratamento | Temperatura | Equação 7 | | | Equação 8 | | |
|------------|-------------|-----------|--------|----------------|-----------|--------|----------------|
| | | a | b | R ² | a | b | R ² |
| Controle | 60 °C | 0.5505 | 0.4381 | 0.873 | 0.5634 | 0.4003 | 0.881 |
| | 70 °C | 0.4515 | 0.5824 | 0.946 | 0.4924 | 0.5103 | 0.986 |
| US 30 min | 60 °C | 0.6021 | 0.4260 | 0.948 | 0.7468 | 0.2348 | 0.939 |
| | 70 °C | 0.7468 | 0.2335 | 0.906 | 0.7603 | 0.2303 | 0.964 |
| IM 30 min | 60 °C | 0.5575 | 0.4722 | 0.968 | 0.7605 | 0.2282 | 0.975 |
| | 70 °C | 0.6911 | 0.3199 | 0.988 | 0.7086 | 0.2875 | 0.966 |
| OD 60 min | 60 °C | 0.5998 | 0.4244 | 0.897 | 0.6259 | 0.3823 | 0.981 |
| | 70 °C | 0.4835 | 0.5675 | 0.910 | 0.5471 | 0.4582 | 0.985 |

Em que: a e b são os parâmetros de ajuste da Eq.7 e da Eq.8; R² é o coeficiente de correlação.

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 6 - Coeficientes de difusividade efetiva de umidade (D_{eff}) das amostras.

| Tratamento | Temperatura (°C) | Encolhimento | | Encolhimento Volumétrico | |
|------------|---------------------|--|----------------|--|----------------|
| | | Negligenciável | | Considerado | |
| | | D _{eff} × 10 ¹¹ (m ² s ⁻¹) | R ² | D _{eff} × 10 ¹³ (m ² s ⁻¹) | R ² |
| Controle | 60 °C | 1.36 | 0.984 | 6.78 | 0.920 |
| | 70 °C | 1.60 | 0.981 | 5.90 | 0.944 |
| US 30 min | 60 °C | 1.74 | 0.984 | 10.5 | 0.935 |
| | 70 °C | 1.91 | 0.982 | 10.5 | 0.880 |
| IM 30 min | 60 °C | 2.07 | 0.988 | 4.56 | 0.943 |
| | 70 °C | 1.95 | 0.982 | 10.8 | 0.955 |
| OD 60 min | 60 °C | 1.26 | 0.985 | 7.81 | 0.898 |
| | 70 °C | 1.65 | 0.985 | 6.32 | 0.944 |

Fonte: Da autora (2022).

A partir da Tabela 6, é possível observar que o encolhimento apresentou grande influência na difusividade de umidade das amostras. Menores valores de D_{eff} foram obtidos quando o cálculo associava ao encolhimento das amostras. Valores entre 1.26×10^{-11} a 2.07×10^{-13} para o cálculo considerando o encolhimento das amostras ao longo da secagem. O encolhimento afeta a taxa de transferência de massa e calor durante a secagem, devido à redução

da área de superfície do produto, encurtando o caminho de difusão da água dentro das amostras. Assim, a inclusão do encolhimento na modelagem matemática da secagem é importante, garantindo previsões precisas do teor de umidade e qualidade do produto durante o processo (SEYEDABADI; KHOJASTEHPUR; ABBASPOUR-FARD, 2017).

De maneira geral, para ambos os cálculos efetuados, o coeficiente de difusividade aumentou com o aumento da temperatura e foi maior para amostras submetidas a pré-tratamentos. Isso evidencia que a difusão é um importante mecanismo de movimento das moléculas de água nas amostras, direcionando a secagem (MACEDO *et al.*, 2020). Os tratamentos aplicados às fatias de banana previamente ao processo de secagem podem ter auxiliado na rápida conversão de água ligada em água livre, promovendo maior transferência de água para a superfície e, assim, aumentando o coeficiente de difusão de umidade (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022). Amostras tratadas com US e IM apresentaram maiores valores de D_{eff} quando comparadas ao tratamento controle, possivelmente devido à desestabilização celular. Do ponto de vista prático, o elevado valor de difusividade pode ser observado nos reduzidos tempos de secagem obtidos por esses tratamentos. Resultado semelhante foi observado em estudo com bananas verdes, no qual a aplicação da energia ultrassônica resultou em um aumento de 4.8% na difusividade efetiva de umidade (LA FUENTE; TADINI, 2018). Em estudo com mamão, o aumento na difusividade pelo uso de US foi associado à formação de microcanais, que facilita a movimentação das moléculas de água para a superfície da fruta (AZOUBEL *et al.*, 2015). Quando associado ao etanol como pré-tratamento, a aplicação de US promoveu maiores valores de difusividade em bananas, apresentando uma tendência crescente com o aumento do tempo de tratamento (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022).

As mudanças físicas e químicas nas fatias de banana durante o pré-tratamento osmótico (OD) resultaram em diferentes taxas de secagem e consequente reduzido valor de difusividade quando comparado a demais pré-tratamentos. Possivelmente, a desidratação osmótica promoveu uma saturação da superfície das amostras com moléculas de isomaltulose, criando uma resistência extra para os processos de transferência de calor e massa. Macedo *et al.* (2021) também observaram que amostras que tiveram incorporação de sólidos apresentaram uma tendência de demanda por maior tempo de secagem. Os autores correlacionaram isso com a maior incorporação de soluto durante processos osmóticos, aumentando a quantidade e a força das ligações de água com o alimento, dificultando a perda de umidade.

Embora os resultados de D_{eff} encontrados no presente estudo estejam de acordo com a literatura (BAINI; LANGRISH, 2007; GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022; KADAM;

DHINGRA, 2011; MACEDO *et al.*, 2020; THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011), é importante ressaltar que a comparação da difusividade é difícil devido aos diferentes métodos e modelos de estimativa empregados em conjunto com a variação na composição e estrutura dos alimentos (AZOUBEL *et al.*, 2010, 2015).

3.2.2 Consumo energético

A secagem é uma operação unitária reconhecida pelo elevado gasto energético, especialmente quando envolve o uso de ar em temperaturas elevadas. O processo de secagem convectiva envolve o aquecimento de uma significativa quantidade de ar, o que resulta em uma elevada demanda energética. Desse modo, a estimativa do consumo de energia é interessante na avaliação dos custos e impactos de todo o processo (MACEDO *et al.*, 2022; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). A Tabela 7 apresenta a estimativa do consumo total de energia (TEC) durante o processo de secagem, incluindo a energia necessária durante o pré-tratamento ultrassônico. É possível observar que dentre as condições de secagem avaliadas, a aplicação do pré-tratamento de imersão em água (IM) resultou em menor consumo energético durante o processo, para ambas as temperaturas (60 e 70 °C). O pré-tratamento de IM ocasionou em uma redução de 57.29% do consumo energético comparado ao controle para a secagem na temperatura de 60 °C e 31.87% na secagem a 70 °C. Isso demonstra como a aplicação desse tratamento pode contribuir positivamente na redução do consumo de energia em um processo de secagem, com um possível impacto positivo tanto no custo quanto ao meio ambiente.

Tabela 7 - Consumo energético estimado do processo de secagem convectiva de bananas (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.

| Tratamento | Temperatura de secagem (°C) | E_{US} (kWh . kg ⁻¹) | E_D (kWh . kg ⁻¹) | TEC (kWh . kg ⁻¹) |
|-------------------|------------------------------------|--|---|---|
| Controle | 60 | - | 251.874 | 251.874 |
| | 70 | - | 214.518 | 214.518 |
| US 30 min | 60 | 0.015 | 377.232 | 377.243 |
| | 70 | 0.015 | 359.473 | 359.484 |
| IM 30 min | 60 | - | 107.570 | 107.570 |
| | 70 | - | 146.142 | 146.142 |
| OD 60 min | 60 | - | 361.718 | 361.718 |
| | 70 | - | 313.057 | 313.057 |

Os resultados foram calculados usando valores médios de três repetições para cada parâmetro.
Fonte: Da autora (2022).

Apesar de reduzir o tempo final de secagem quando comparado ao controle, a aplicação de US e OD como pré-tratamentos resultou em maior consumo energético. Durante o processo osmótico, a incorporação de solutos pode dificultar a difusão de água, a partir da criação de uma resistência externa para a transferência de massa e calor na secagem convectiva, demandando mais energia para a perda de umidade (DA SILVA *et al.*, 2016; MACEDO *et al.*, 2022). Um ponto interessante a ser observado é que a energia consumida durante o pré-tratamento ultrassônico (US) representa menos de 0.005% de toda a energia consumida durante a secagem. A capacidade do equipamento e as condições aplicadas no estudo (40 kHz de frequência e potência de 70 W) têm grande influência nesse consumo energético reduzido.

Além disto, vale ressaltar que tais resultados são uma estimativa da energia necessária para realizar o processo de secagem em dadas condições. Certamente, a energia elétrica consumida no processo será maior, uma vez que nos cálculos apresentados foram desconsiderados a eficiência do secador, as condições ambientais e do equipamento, entre outros fatores.

3.3 Encolhimento volumétrico

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

microestrutura e promovendo encolhimento (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017). Os parâmetros de encolhimentos das bananas secas estão apresentados na Tabela 8. Para melhor comparação, os valores apresentados foram calculados a partir das medidas de diâmetro e espessura das amostras no final da secagem convectiva.

Tabela 8 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.

| Tratamento | Temperatura (°C) | SR | SL | SC | SI |
|-------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Controle | 60 | 0.182 | 0.413 | 0.606 | 0.439 |
| | 70 | 0.205 | 0.430 | 0.641 | 0.490 |
| US 30 min | 60 | 0.098 | 0.288 | 0.420 | 0.375 |
| | 70 | 0.098 | 0.315 | 0.445 | 0.360 |
| IM 30 min | 60 | 0.124 | 0.395 | 0.534 | 0.311 |
| | 70 | 0.122 | 0.289 | 0.447 | 0.461 |
| OD 60 min | 60 | 0.152 | 0.348 | 0.531 | 0.436 |
| | 70 | 0.179 | 0.454 | 0.632 | 0.395 |

Em que SR representa encolhimento radial, SL o encolhimento longitudinal, SC o coeficiente de encolhimento e SI o encolhimento isotrópico. Valores representam médias de três repetições.

Fonte: Da autora (2022).

Como pode ser observado na Tabela 8, o encolhimento longitudinal foi maior que o encolhimento radial. Comportamento semelhante foi observado em estudo com fatias de bananas maduras e verdes (CORRÊA *et al.*, 2012; SEYEDABADI; KHOJASTEHPUR; ABBASPOUR-FARD, 2017). Segundo os autores, tal comportamento é esperado, pois a transferência de massa ocorre na direção longitudinal, devido à posição do fluxo de ar quente. Além disso, é importante destacar que as fatias de banana que não foram submetidas a pré-tratamentos (amostras controle), obtiveram maiores valores de encolhimento longitudinal, encolhimento radial e coeficiente de encolhimento (SC). Tal comportamento pode ser atribuído à umidade removida e ao estresse celular sofrido ao longo do processo de secagem (THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011).

Como resultado da redução do tempo total de secagem, as bananas secas tratadas previamente com US apresentaram maior integridade das paredes celulares e menor retração, apresentando menores valores dos parâmetros de encolhimento comparadas com as amostras tratadas com outros métodos. Com a aplicação da energia ultrassônica, a microestrutura celular

fica mais porosa, a partir da formação dos microcanais, possibilitando um maior número de vias para a difusão de água, levando, assim, a uma remoção de umidade mais rápida em direção à superfície. Também é importante destacar que a rápida evaporação da água desencadeada pela secagem pode criar um grande fluxo de vapor na superfície, o que ajuda a prevenir o colapso do tecido celular e o encolhimento (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; ZHAO *et al.*, 2019).

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

O coeficiente isotrópico (SI) é um interessante parâmetro de análise, especialmente para produtos com espessuras menores, pois apresenta grande efeito na taxa de secagem. Em amostras finas, as moléculas de água possuem menos distância para difundir e atingir a superfície do produto. Como a umidade é removida inicialmente da superfície externa do produto, o encolhimento ocorre da superfície externa em direção ao centro da amostra (SAHA *et al.*, 2018). No presente estudo, é possível observar que as amostras controle apresentaram maiores valores de SI e amostras tratadas com US apresentaram valores menores.

3.4 Caracterização físico-química

A redução do teor de umidade das fatias de banana, promovida pela secagem, contribui para o aumento de sua estabilidade, além de reduzir o seu peso e volume (LA FUENTE; TADINI, 2018; MACEDO *et al.*, 2020). O teor de umidade final das amostras (TABELA 9) variou entre 0.117 a 0.312 kg H₂O/kg d.b, com pouca diferença estatística entre os tratamentos. Ademais, observa-se que fatias de bananas que não foram submetidas a nenhum pré-tratamento apresentaram maiores teores de umidade final, independentemente da temperatura de secagem.

A a_w das fatias de banana secas foi influenciada significativamente ($p < 0.05$) pela aplicação de pré-tratamentos e pela temperatura do ar de secagem (TABELA 9), apresentando valores entre 0.442 a 0.547. Tais valores indicam um produto estável do ponto de vista químico e microbiológico ($a_w < 0.6$), independentemente da condição de secagem utilizada. Comparada

com o valor obtido pela amostra fresca (TABELA 1), observa-se que a secagem resultou em valores de a_w reduzidos em mais de 50%. Tal dado é importante, pois alimentos com elevadas a_w são mais susceptíveis ao crescimento microbiano, e consequente degradação (KOWALSKI; SZADZIŃSKA, 2014; MACEDO *et al.*, 2022). Além disto, dentre os pré-tratamentos aplicados nas fatias de banana, a DO resultou em amostras com maiores valores de a_w . Resultado semelhante foi observado em goiabas (KEK; CHIN; YUSOF, 2013) e morangos (AMAMI *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2021). Com a incorporação de isomaltulose, a estrutura e composição celular das fatias de banana se alteram, promovendo novas interações entre as moléculas de água e a amostra, influenciando na fugacidade da água e consequentemente no teor de a_w (MACEDO *et al.*, 2021).

A partir da Tabela 9 é possível observar que tanto os valores de pH quanto os de acidez titulável das amostras não se diferiram estatisticamente ($p < 0.05$). Os valores encontrados para os parâmetros, independentemente da condição de secagem, aproximaram-se dos valores encontrados em outros estudos (MACEDO *et al.*, 2020; THIPPANNA; TIWARI, 2015). A acidez é um fator relevante na aceitação sensorial e na qualidade das bananas, influenciando a percepção de sabor. Além disto, é um parâmetro que sofre grande influência da temperatura e controla atividades enzimáticas, contribuindo para a qualidade do produto (MACEDO *et al.*, 2020).

Tabela 9 - Teor de umidade final (X_f), atividade de água (a_w), pH e acidez titulável de fatias de bananas (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) secas.

| Tratamento | T (°C) | X_f (kg H ₂ O/kg d.b) | a_w | pH | Acidez (%) |
|------------|--------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Controle | 60 | 0.311 ± 0.078 ^a | 0.464 ± 0.004 ^c | 5.04 ± 0.16 ^a | 1.253 ± 0.096 ^a |
| | 70 | 0.312 ± 0.052 ^a | 0.468 ± 0.003 ^c | 5.17 ± 0.10 ^a | 0.962 ± 0.152 ^a |
| US 30 min | 60 | 0.183 ± 0.069 ^{ab} | 0.463 ± 0.007 ^c | 5.29 ± 0.24 ^a | 0.950 ± 0.106 ^a |
| | 70 | 0.117 ± 0.049 ^b | 0.442 ± 0.019 ^c | 5.09 ± 0.20 ^a | 1.061 ± 0.232 ^a |
| IM 30 min | 60 | 0.274 ± 0.009 ^{ab} | 0.462 ± 0.001 ^c | 5.12 ± 0.01 ^a | 0.812 ± 0.023 ^a |
| | 70 | 0.158 ± 0.070 ^{ab} | 0.454 ± 0.006 ^c | 5.18 ± 0.62 ^a | 1.028 ± 0.151 ^a |
| OD 60 min | 60 | 0.286 ± 0.008 ^{ab} | 0.547 ± 0.009 ^a | 4.82 ± 0.11 ^a | 1.259 ± 0.164 ^a |
| | 70 | 0.267 ± 0.063 ^{ab} | 0.514 ± 0.002 ^b | 5.08 ± 0.26 ^a | 0.812 ± 0.117 ^a |

Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

A cor dos alimentos é importante parâmetro, influenciando na aceitação do produto e informando sobre alguns aspectos da sua qualidade (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017; MACEDO *et al.*, 2021; OSAE *et al.*, 2019). A exposição do alimento ao ar aquecido pode resultar em reações químicas responsáveis pela alteração de sua coloração, como escurecimento enzimático e não-enzimático. A reação de Maillard está diretamente ligada à temperatura e à duração do processo (CORRÊA *et al.*, 2012; MACEDO *et al.*, 2021). A relação dos tratamentos aplicados na coloração das fatias de banana secas está apresentada na Tabela 10. Comparada com as amostras controle, a aplicação de pré-tratamentos nas fatias de banana resultou no incremento dos parâmetros b^* , C^* e H° e a diminuição dos valores de a^* .

Entre as condições de secagem aplicadas, não houve diferença estatística no parâmetro L^* ($p < 0.05$). Menores valores de L^* podem indicar amostras mais escuras, com pigmentos escuros, como as melanoidinas, formadas durante o processo de secagem (MACEDO *et al.*, 2021; PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013). Comumente, menores tempos de secagem e menores temperaturas resultam em valores de L^* mais elevados, com menor formação de compostos escuros.

É possível observar que as amostras tratadas com OD obtiveram valores de C^* significativamente ($p < 0.05$) maiores que demais tratamentos (TABELA 10). Isso pode ser devido a lixiviação de compostos durante o tratamento osmótico e a impregnação de isomaltulose. Segundo Pathare, Opara e Al-Said. (2013), amostras com valores de C^* elevados apresentam uma coloração mais intensa, especialmente para a percepção humana. Os parâmetros H° e b^* apresentaram comportamento semelhante ao parâmetro C^* . Sendo o último relativamente importante neste estudo, pois seu valor positivo se relaciona com tons mais amarelados nas amostras. Os tratamentos IM e US podem ter resultado na lixiviação de pigmentos importantes na coloração das fatias de banana.

A diferença de coloração entre as fatias de bananas secas pode ser observada visualmente na Figura 3, em que amostras tratadas com US e IM apresentaram tonalidade mais clara que demais tratamentos. Além disto, a coloração amarela das fatias de banana é um relevante indicador da presença de vitamina A e seu precursor β -caroteno. A cor também está associada ao teor de compostos bioativos, especialmente flavonoides, que são responsáveis pelo aroma da fruta (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022).

Tabela 10 - Parâmetros de cor de fatias de banana (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) secas sob diferentes condições.

| Tratam. | T (°C) | a* | b* | L* | C* | H° |
|------------------|-----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Controle | 60 | 5.45 ± 0.96 ^{ab} | 24.77 ± 3.55 ^{bc} | 62.72 ± 2.85 ^{ab} | 25.36 ± 3.64 ^{cd} | 77.67±1.01 ^b |
| | 70 | 5.94 ± 0.52 ^a | 30.15 ± 2.42 ^b | 58.94 ± 1.69 ^b | 30.54 ± 2.32 ^{bc} | 78.77± 1.40 ^b |
| US 30 min | 60 | 4.17± .86 ^{bcd} | 19.41 ± 3.96 ^{cd} | 68.41 ± 7.72 ^a | 19.85 ± 4.04 ^{de} | 77.911±1.05 ^b |
| | 70 | 3.83 ± 0.59 ^{cd} | 18.06 ± 5.51 ^d | 69.86 ± 3.33 ^a | 18.73 ± 5.10 ^e | 77.81± 1.51 ^b |
| IM 30 min | 60 | 4.47 ± 1.68 ^{bc} | 19.64 ± 5.35 ^{cd} | 67.92 ± 7.89 ^a | 20.07 ± 5.59 ^{de} | 77.80± 1.68 ^b |
| | 70 | 4.40±0.57 ^{bcd} | 21.35 ± 3.77 ^{cd} | 65.76 ± 3.31 ^{ab} | 21.80 ± 3.79 ^{de} | 78.30± 1.12 ^b |
| OD60 min | 60 | 3.06 ± 0.39 ^d | 37.62 ± 3.16 ^a | 62.99 ± 2.74 ^{ab} | 37.55 ± 3.26 ^a | 85.33± 0.84 ^a |
| | 70 | 3.08 ± 0.99 ^{cd} | 35.67 ± 3.48 ^a | 62.67 ± 3.48 ^{ab} | 36.78 ± 2.57 ^{ab} | 85.30± 1.39 ^a |

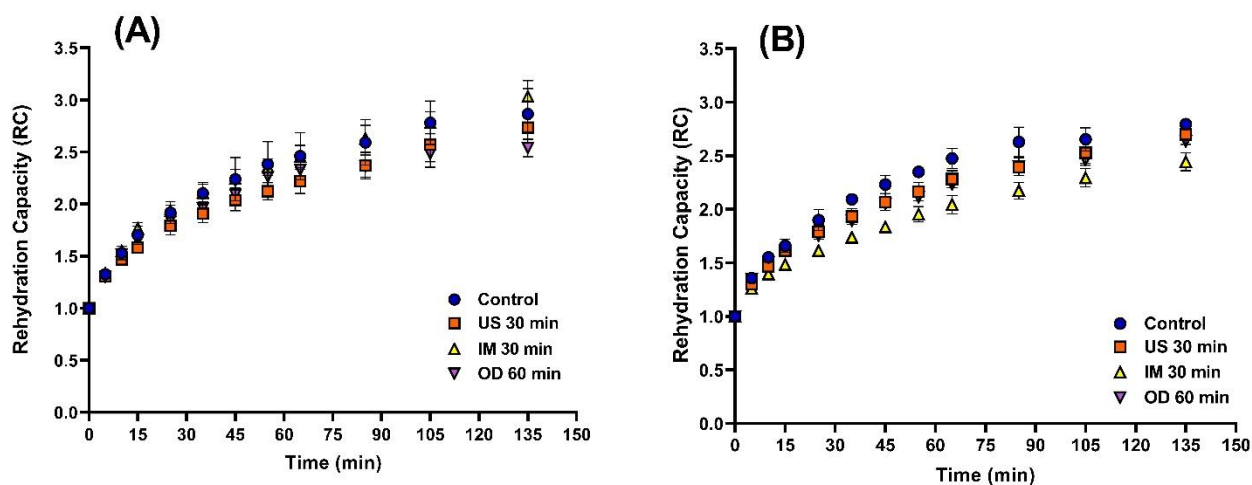
Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

3.5 Capacidade de reidratação

A reidratação é um importante parâmetro de avaliação da qualidade de produtos desidratados, estando diretamente relacionada com as condições de secagem empregadas e o seu efeito na estrutura e composição do produto (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). No decorrer da reidratação, o alimento submerso na água sofre diversas mudanças simultâneas, especialmente no seu conteúdo de umidade e de sólidos, porosidade, volume e temperatura. A capacidade de reidratação das fatias de banana secas ao longo do tempo está apresentada na Figura 7. O pré-tratamento de imersão (IM) associado com a temperatura de secagem de 60 °C melhorou as propriedades de reidratação das fatias de banana em comparação com as amostras controle. Quando avaliado a temperatura de secagem de 70 °C (FIGURA 7B), as amostras controle apresentaram maior capacidade de reidratação ao longo do tempo. Isso reflete que os efeitos dos tratamentos nas propriedades de reidratação são específicos para cada amostra e dependem das condições de secagem.

Figura 7 - Cinética de reidratação de fatias de bananas (*Musa Sapientum* L., Prata variety) a 60 °C (A) e 70 °C (B) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.



Fonte: Da autora (2022).

É importante ressaltar que a capacidade de reidratação e a quantidade de umidade absorvida dependem do grau de degradação celular e estrutural causada pela aplicação de pré-tratamentos, como a energia ultrassônica (KROKIDA; MAROULIS, 2001; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). Embora o US cause uma rápida absorção de água pelas amostras, a retenção da água absorvida pode ser prejudicada pelo dano estrutural e a formação de microcanais (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). Alterações estruturais podem resultar na perda da absorção de água pelas cavidades celulares, proporcionalmente à quantidade de água absorvida com o aumento da temperatura. Temperaturas muito elevadas, tanto de secagem quanto de reidratação, reduzem a absorção de água devido ao colapso estrutural (AGNIESZKA; ANDRZEJ, 2010; CONTRERAS; MARTÍN-ESPARZA; MARTÍNEZ-NAVARRETE, 2011; GARCÍA-SEGOVIA; ANDRÉS-BELLO; MARTÍNEZ-MONZÓ, 2011) Frutas e vegetais desidratados de forma eficiente apresentam menor encolhimento e conseqüente melhor reidratação (AKHIJAHANI; ARABHOSSEINI; KIANMEHR, 2017; HORUZ *et al.*, 2017). Alimentos secos em temperaturas de secagem mais elevadas apresentam estrutura mais porosa, o que permite maior penetração de água (ARAL; BESE, 2016).

4 CONCLUSÕES

Dentre os modelos empíricos aplicados no estudo, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou à cinética de secagem convectiva de fatias de banana nas temperaturas de 60 e 70 °C. O modelo difusional de Fick foi satisfatório no ajuste dos dados experimentais, estimando a

difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. O coeficiente de difusividade aumentou com o aumento da temperatura e foi maior para amostras submetidas a pré-tratamentos.

O uso de energia ultrassônica como tratamento prévio à secagem convectiva de fatias de bananas resultou em redução do tempo de secagem de até 22%, apresentando maiores valores de difusividade efetiva de água, além de proporcionar menor encolhimento tanto radial como longitudinal.

A desidratação osmótica proporcionou a produção de fatias de banana incorporadas de isomaltulose, porém não foi efetiva na redução de tempos e parâmetros de cinética de secagem. Entretanto, o tratamento resultou em cores intensas e melhor aspecto físico.

A imersão das amostras em água previamente à secagem convectiva mostrou-se um eficiente tratamento, reduzindo tempos de secagem, apresentando menor consumo energético além de proporcionar amostras com melhor capacidade de reidratação.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; KAVEH, M.; JAHANBAKHSI, A. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 43, n. 11, p. 1–17, Nov. 2019. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14178>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ABRAHÃO, F. R.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1–20, Sept. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583597/>. Acesso em: 29 jan. 2022.

AGNIESZKA, C.; ANDRZEJ, L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 97, n. 2, p. 267–274, Mar. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877409005202>. Acesso em: 19 fev. 2022.

AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 34, p. 29–43, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416000072>. Acesso em: 19 fev. 2022.

AKHIJAHANI, H. S.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M. H. Comparative quality assessment of different drying procedures for plum fruits (*Prunus domestica* L.). **Czech Journal of Food Sciences**, [Prague], v. 35, n. 5, p. 449–455, Sept. 2017. Disponível em: https://www.agriculturejournals.cz/web/cjfs.htm?type=article&id=440_2016-CJFS. Acesso em: 20 ago. 2021.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 59, n. 1, p. 99-104, Aug. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877402004259>. Acesso em: 29 jan. 2020.

AMAMI, E. *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 36, p. 286–300, May 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417716304473>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 18th ed. Arlington: AOAC, 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**, [Oxford], v. 210, p. 577–584, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814616306550>. Acesso em: 29 jan. 2022.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 97, n. 2, p. 194–198, Mar. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740900507X>. Acesso em: 29 jan. 2022.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Improvement of water transport and carotenoid retention during drying of papaya by applying ultrasonic osmotic pretreatment. **Food Engineering Reviews**, [New York], v. 7, n. 2, p. 185–192, Mar. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-015-9120-4>. Acesso em: 29 jan. 2022.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 79, n. 1, p. 330–343, Mar. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877406001476>. Acesso em: 29 jan. 2022.

CONTRERAS, C.; MARTÍN-ESPARZA, M. E.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Influence of drying method on the rehydration properties of apricot and apple. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 35, n. 2, p. 178–190, Feb. 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2010.00579.x>. Acesso em: 29 jan. 2022.

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**, [Oxford], v. 41, p. 284–291, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416306725>. Acesso em: 29 jan. 2022.

CORRÊA, J. L. G. *et al.* Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 96, n. 4, p. 498–504, Feb. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877409004373>. Acesso em: 09 jun. 2019.

CORRÊA, J. L. G. *et al.* The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 8, p. 817–826, May 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.667469>. Acesso em: 09 jun. 2019.

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**, [Berkeley], v. 11, n. 4, p. 505–516, June 2015. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2015-0083/html>. Acesso em: 09 jun. 2019.

DA SILVA, G. D. *et al.* Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 74, p. 114–119, Dec. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002364381630442X>. Acesso em: 29 jan. 2022.

DE MENDONÇA, K. S. *et al.* Influences of convective and vacuum drying on the quality attributes of osmo-dried pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) slices. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 224, p. 212–218, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814616320611>. Acesso em: 29 jan. 2022.

FARHANINEJAD, Z. *et al.* Osmotic dehydration of banana slices using direct and indirect sonication: Optimization and microstructure analysis. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 40, n. 1, p. 1–10, Feb. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12336>. Acesso em: 22 jul. 2020.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 41, n. 4, p. 604–610, May 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807001867>. Acesso em: 21 fev. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 12, p. 1509–1516, Dec. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802412256?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 21 fev. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 82, n. 2, p. 261–267, Sept. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407001240>. Acesso em: 22 fev. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of genipap (*Genipa americana* L.). **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 8, n. 3, p. 1–8, July 2012. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/1556-3758.2480/html>. Acesso em: 29 jan. 2022.

GARCÍA-SEGOVIA, P.; ANDRÉS-BELLO, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 2, p. 480–488, Mar. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643810002884>. Acesso em: 29 jan. 2022.

GHIMIRE, R. *et al.* Effect of different levels of gibberellic acid and kinetin on quality and self-life of banana (*Musa* spp.) fruits. **Heliyon**, [United Kingdom], v. 7, n. 9, Sept. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021021228>. Acesso em: 29 jan. 2022.

GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 76, Mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856422000182>. Acesso em: 29 jan. 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [Pavia], v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-\(I\)-Temperature-Effect-on-Henderson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d](https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-(I)-Temperature-Effect-on-Henderson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d). Acesso em: 18 abr. 2020.

HORUZ, E. *et al.* Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 230, p. 295–305, Sept. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28407914/>. Acesso em: 9 jan. 2022.

JAHANBAKHSI, A. *et al.* Assessment of kinetics, effective moisture diffusivity, specific energy consumption, shrinkage, and color in the pistachio kernel drying process in microwave drying with ultrasonic pretreatment. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 44, n. 6, p. 1–15, June 2020. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14449>. Acesso em: 09 jan. 2022.

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**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–8, Dec. 2017. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.13250>. Acesso em: 20 jun. 2019.

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**, [Amsterdam], v. 82, p. 404–410, Sept. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643817302992>. Acesso em: 20 jun. 2019.

KADAM, D. M.; DHINGRA, D. Mass transfer kinetics of banana slices during osmo-convective drying. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 34, n. 2, p. 511–532, Apr. 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2009.00373.x>. Acesso em: 29 jan. 2022.

KEK, S. P.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. **Food and Bioprocess Processing**, [England], v. 91, n. 4, p. 495–506, Oct. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096030851300045X>. Acesso em: 29 jan. 2022.

KHAWAS, P. *et al.* Drying characteristics and assessment of physicochemical and microstructural properties of dried culinary banana slices. **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 11, n. 5, p. 667–678, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2015-0094/html>. Acesso em: 20 set. 2020.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 82, p. 65–70, Aug. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270114001196>. Acesso em: 29 jan. 2022.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Structural properties of dehydrated products during rehydration. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 36, n. 5, p. 529–538, June 2001. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2621.2001.00483.x>. Acesso em: 29 jan. 2022.

LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: Effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. **Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 55, n. 12, p. 5098–5105, Oct. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-018-3450-1>. Acesso em: 22 fev. 2022.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, [Washington], v. 13, n. 5, p. 427–432, May 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50137a021>. Acesso em: 29 nov. 2021.

LI, J. *et al.* Improvement of banana postharvest quality using a novel soybean protein isolate/cinnamaldehyde/zinc oxide bionanocomposite coating strategy. **Scientia Horticulturae**, [Amsterdam], v. 258, Dec. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423819306727>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Convective drying with ethanol pre-treatment of strawberry enriched with isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 14, p. 2046–2061, Sept. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02710-2>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 43, n. 9, p. 1–10, Sept. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13451>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 155, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821020715>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MAGALHÃES, M. L. *et al.* Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 215, p. 72–77, Dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417303254>. Acesso em: 19 nov. 2021.

MEDEIROS, R. A. B. de *et al.* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 67, p. 167–173, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815303406>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MELLO, R. E. *et al.* PEF as pretreatment to ultrasound-assisted convective drying: Influence on quality parameters of orange peel. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 72, Aug. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856421001545>. Acesso em: 29 jan. 2022.

MIANO, A. C.; IBARZ, A.; AUGUSTO, P. E. D. Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 29, p. 413–419, Mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417715300638>. Acesso em: 20 jan. 2022.

MIERZWA, D.; KOWALSKI, S. J.; KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. **Food Technology and Biotechnology**, [Zagreb], v. 55, n. 2, p. 197–205, June 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5569343/>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ODEWOLE, M. M.; OLANIYAN, A. M. Effect of osmotic dehydration pretreatments on drying rate and post-drying quality attributes of red bell pepper (*capsicum annuum*). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 18, n. 1, p. 226–236, Mar. 2016. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2922>. Acesso em: 22 jan. 2022.

OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with *Stevia*-based sweetener. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 90, n. 4, p. 713–718, Oct. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000107>. Acesso em: 22 jan. 2021.

OSAE, R. *et al.* Nonthermal pretreatments enhances drying kinetics and quality properties of dried ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 42, n. 5, Aug. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13117>. Acesso em: 29 abr. 2020.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. 44 p. Master (Science in Mechanical Engineering) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A.-J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 36–60, Jan. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0867-9>. Acesso em: 29 jan. 2022.

PRITHANI, R.; DASH, K. K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 64, Aug. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420303532>. Acesso em: 29 jan. 2022.

RICCE, C. *et al.* Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 89, p. 701–708, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916304215>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 61, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420302745>. Acesso em: 09 jul. 2020.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 233, p. 17–27, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877418301390>. Acesso em: 09 jul. 2020.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 119, p. 20–30, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308519305851>. Acesso em: 09 jul. 2020.

SAHA, B. *et al.* Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 226, p. 42–52, June 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877418300220>. Acesso em: 29 jan. 2022.

SEYEDABADI, E.; KHOJASTEHPUR, M.; ABBASPOUR-FARD, M. H. Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian–Eulerian method. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 20, n. 1, p. S36–S49, May 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2017.1288134>. Acesso em: 29 jan. 2022.

SHYAM, S.; RAMADAS, A.; CHANG, S. K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 48, p. 173–178, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464618303372>. Acesso em: 29 jan. 2022.

SILVA JUNIOR, E. V. da *et al.* Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 97, p. 317–322, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306005>. Acesso em: 29 jan. 2022.

SOUZA, A. U. de *et al.* Hybrid microwave-hot air drying of the osmotically treated carrots. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 156, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364382102199X>. Acesso em: 29 jan. 2022.

SPERANÇA, M. A. *et al.* Biofortification quality in bananas monitored by energy-dispersive X-ray fluorescence and chemometrics. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 362, Nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030881462101178X>. Acesso em: 29 jan. 2022.

TABTIANG, S.; PRACHAYAWARAKON, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 1, p. 20–28, Jan. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.613554>. Acesso em: 29 jan. 2022.

THIPPANNA, K. S.; TIWARI, R. B. Quality changes in osmotically dehydrated banana var. 'Robusta' and 'Ney Poovan' as affected by syrup concentration and immersion time. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 52, n. 1, p. 399–406, May 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-013-1008-9>. Acesso em: 27 jan. 2022.

THUWAPANICHAYANAN, R. *et al.* Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 6, p. 1502–1510, July 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643811000041>. Acesso em: 27 jan. 2022.

VON LOESECKE, H. W. **Bananas: Chemistry, physiology**. New York: Technology Inter Science, 1950.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying**. ASAE Meeting paper No. 78-6505, St. Joseph, MI, 1978. Disponível em: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002003579923786. Acesso em: 25 jan. 2022.

WANG, L. *et al.* Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. **Ultrasonics - Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 40, p. 619–628, Jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28946467/>. Acesso em: 19 jan. 2022.

WIKTOR, A. *et al.* Drying kinetics and quality of dehydrated cranberries pretreated by traditional and innovative techniques. **Journal of Food Science**, [Malden], v. 84, n. 7, p. 1820–1828, July 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31206662/>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ZHANG, L. *et al.* Ultrasound-assisted rehydration of dried Sea Cucumber (*Stichopus japonicus*) – kinetics. **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 12, n. 8, p. 753–761, Sept. 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2016-0116/html>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ZHAO, Y.-Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 3, p. 352–362, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2018.1456449?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 29 jan. 2022.

**ARTIGO 2 - EFEITO DO ULTRASSOM E DA DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA
COMO PRÉ-TRATAMENTOS NA SECAGEM DE FATIAS DE BANANA (*Musa
Sapientum L., Prata variety*) POR INFRAVERMELHO**

Fernanda Rezende Abrahão^{1*}; Jefferson Luiz Gomes Corrêa¹; Arley de Brito Magalhães
Sousa²; Paula Giarolla Silveira¹; Renata Nepomuceno da Cunha².

¹Departamento de Ciência dos Alimentos DCA-UFLA, 32700-900, Lavras, MG, Brasil.

²Departamento de Engenharia Química, UNIPAM, 38702-054, Patos de Minas, MG, Brasil.

RESUMO

O objetivo do estudo foi avaliar a influência do ultrassom e do processo osmótico na secagem por infravermelho de fatias de banana. Os experimentos de secagem foram realizados na temperatura de 70 °C, com a aplicação dos seguintes pré-tratamentos: imersão em água assistida por ultrassom (US) por 20 e 30 minutos, desidratação osmótica (OD) e desidratação osmótica assistida por ultrassom (USOD) por 20, 30 e 40 minutos. O processo osmótico foi constituído de imersão das amostras em isomaltulose (29.0 °Brix) por 60 minutos. Todos os modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem apresentaram bom ajuste, com valores de R^2 altos (> 0.98) e reduzidos valores de E (%), SSE e RMSE. O coeficiente de difusividade de Fick (D_{eff}) foi maior para amostras tratadas previamente por US por 20 e 30 minutos. O tratamento US resultou em menores tempos de secagem, com redução de até 29% do tempo médio. OD não foi eficiente na redução do tempo de secagem, resultando em amostras com taxas de secagem reduzidas. Amostras tratadas com US apresentaram menor encolhimento isotrópico (0.437 ± 0.140) e melhor coloração. O processo osmótico resultou em amostras com maior capacidade de reidratação.

Palavras-chave: Cinética de secagem. Modelagem matemática. Enriquecimento de alimentos. Isomaltulose. Perda de água.

1 INTRODUÇÃO

Operação unitária de grande importância na indústria alimentícia, a secagem é um processo de remoção da umidade de alimentos, caracterizada pela transferência simultânea de calor e de massa (MACEDO *et al.*, 2021; REN *et al.*, 2021). Apesar da vantagem de estender a vida de prateleira dos alimentos, a secagem pode resultar em algumas alterações indesejáveis no produto, como alteração da cor, textura e degradação de compostos nutricionais. Desse modo, a escolha do método e das condições de secagem são primordiais para a obtenção de um produto de qualidade (DUJMIČ *et al.*, 2013; JEEVARATHINAM *et al.*, 2021; REN *et al.*, 2021). A secagem convectiva é o método comumente utilizado. Porém, por apresentar baixa eficiência energética, requer longos períodos de secagem sob altas temperaturas, o que costuma afetar negativamente as propriedades físico-químicas do produto final (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021; PAWAR; PRATAPE, 2017). O uso de tecnologias emergentes, como a radiação infravermelha, pode aumentar substancialmente as taxas de secagem e aprimorar a qualidade do produto (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021).

A secagem por infravermelho é uma técnica caracterizada por maiores taxas de secagem, altos coeficientes de transferência de calor e alta eficiência energética. Como consequência, obtêm-se menores tempos de processo e uma secagem mais uniforme (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021; PEI *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2020). A radiação infravermelha possui comprimento de onda entre 0.78 e 1000 μm , e quando é aplicada na secagem de alimentos (3 a 6 μm) a energia da radiação se converte em calor, auxiliando na desidratação do produto (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021; PAWAR; PRATAPE, 2017). Além disto, a energia infravermelha é transferida da fonte de aquecimento para a amostra sem aquecer o ar circundante, aquecendo o alimento de forma rápida e com uniformidade (ERTEKIN; HEYBELI, 2014; PEI *et al.*, 2021). Na literatura, a secagem por infravermelho já foi estudada em diversos alimentos e produtos agrícolas, como: cenouras (KOCABIYIK; TEZER, 2009; TOĞRUL, 2006), folhas de menta (ERTEKIN; HEYBELI, 2014), raiz de cúrcuma (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021), fatias de banana (PAN *et al.*, 2008; PEKKE *et al.*, 2013; SHI *et al.*, 2020; SWASDISEVI *et al.*, 2009), gengibre (REN *et al.*, 2021), uvas (ÇAĞLAR; TOĞRUL; TOĞRUL, 2009), entre outros. É uma tecnologia que apresenta interessantes resultados, porém é importante ressaltar que sua aplicação ainda é limitada à escala piloto e laboratorial, requerendo maiores análises energéticas e de viabilidade para aplicabilidade em escala industrial (PAWAR; PRATAPE, 2017).

Ademais, é válido ressaltar que uma maior potência de infravermelho pode ampliar a taxa de secagem, mas temperaturas mais elevadas podem minimizar a qualidade do produto final (PAWAR; PRATAPE, 2017; PEI *et al.*, 2021). Desse modo, o uso de pré-tratamentos previamente à secagem pode efetivamente intensificar o calor e a transferência de massa, diminuindo os danos no alimento e melhorando sua qualidade (PEI *et al.*, 2021). Dentre os principais tratamentos usualmente aplicados na literatura, encontram-se o ultrassom (AZOUBEL *et al.*, 2010; CORRÊA *et al.*, 2017; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020) e a desidratação osmótica (PROSAPIO; NORTON, 2017; SOUZA *et al.*, 2022).

A desidratação osmótica (OD) é um método que visa a remoção parcial da umidade de tecidos vegetais a partir da imersão do alimento em soluções hipertônicas de sais e/ou açúcares diversos (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; SOUZA *et al.*, 2022). É uma técnica com grande aplicação no desenvolvimento de novos produtos, pois promove o incremento do valor nutricional e funcional do alimento sem alterar significativamente a sua integridade (AZOUBEL *et al.*, 2015; CORRÊA *et al.*, 2010). Previamente à secagem, a OD pode resultar em maiores taxas de secagem, e conseqüente redução no tempo de processo. A redução da exposição do alimento a altas temperaturas pode promover a melhoria na sua qualidade e aceitação, além de resultar em um processo com gasto energético reduzido (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; CORRÊA *et al.*, 2017; OSAE *et al.*, 2019; PRITHANI; DASH, 2020). Do ponto de vista tecnológico, o processo de OD pode ser uma alternativa de incorporação de solutos com importantes propriedades nutricionais, como a isomaltulose, que é um carboidrato de digestão lenta, com reduzido índice glicêmico, potencial prebiótico, além de reconhecida propriedade não-cariogênica (DO CARMO *et al.*, 2022; SHYAM; RAMADAS; CHANG, 2018).

A aplicação do ultrassom visa ampliar as taxas de transferência de massa, tanto na desidratação osmótica quanto em um processo posterior de secagem (MELLO *et al.*, 2021; RICCE *et al.*, 2016; ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020). A técnica envolve a imersão do alimento, em pedaços, seja em água ou solução aquosa hipertônica, para a qual é aplicada a energia ultrassônica. A aplicação de pré-tratamento por ultrassom aumenta a difusividade efetiva da água no alimento e conduz à uma rápida secagem (AMAMI *et al.*, 2017; CORRÊA *et al.*, 2015; LA FUENTE; TADINI, 2018). O aumento da difusividade efetiva da água pode ser atribuído à formação de canais microscópicos por ondas ultrassônicas (MAGALHÃES *et al.*, 2017; MIANO; IBARZ; AUGUSTO, 2016; RICCE *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2016). Além disto, vale ressaltar que o tratamento ultrassônico não irá incorporar sólidos solúveis na

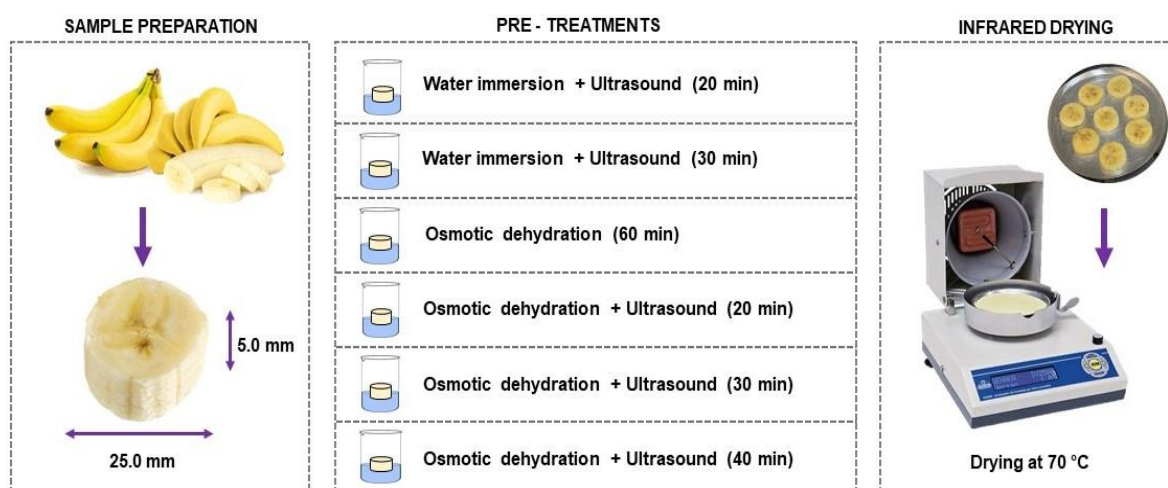
amostra caso apenas água destilada seja utilizada como solvente (FERNANDES; RODRIGUES, 2012; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência do ultrassom e da desidratação osmótica na secagem por infravermelho de fatias de banana da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety). Para a avaliação das cinéticas, diferentes modelos matemáticos foram aplicados no ajuste dos dados e avaliação dos parâmetros de secagem. A caracterização das amostras foi realizada a partir da avaliação do encolhimento, atividade de água, coloração e sua habilidade de reidratação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, o ultrassom isolado e/ou associado ao processo de desidratação osmótica foi aplicado como pré-tratamento na secagem de fatias de banana por infravermelho. O esquema com o *design* experimental está apresentado na Figura 1 e está explicado em seguida. A aplicação do ultrassom em fatias de banana imersas em água teve como objetivo a desestabilização celular, de forma a facilitar o processo de secagem posterior. Ao ser associado no processo osmótico, objetivou-se uma maior de perda de água pelas amostras, além de um significativo ganho de solutos de baixo índice glicêmico, no caso a isomaltulose.

Figura 1 - Design experimental utilizado no estudo de secagem de fatias de banana por infravermelho.



Fonte: Da autora (2022).

2.1 Preparo das amostras

Bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) foram obtidas do mercado local da cidade de Patos de Minas, MG, Brasil. A seleção das frutas foi realizada com base na sua integridade e no grau de maturação através da coloração da casca pela escala de Von Loesecke (1950). Foram selecionadas bananas nos estágios 3 e 4 (aspecto verde/amareladas). As bananas apresentaram teor de sólidos solúveis equivalente a 22.55 ± 0.98 °Brix e teor de umidade inicial de 2.714 ± 0.243 kg H₂O/kg d.b. As amostras foram higienizadas, descascadas manualmente e cortadas transversalmente em fatias com espessura de 0.5 cm e diâmetro de 2.5 cm com um molde e um cortador de inox específico. Buscando reduzir as variações, as amostras de banana de cada repetição pertenciam ao mesmo cacho.

2.2 Pré-tratamentos

Para o pré-processamento das fatias de banana e avaliação da sua influência na secagem por infravermelho, foram selecionadas 3 diferentes condições: imersão em água deionizada em banho ultrassônico (US), desidratação osmótica (OD) e desidratação osmótica assistida por ultrassom (USOD) (TABELA 1). Arranjos de amostras com 8 fatias de banana foram depositadas em béqueres com água deionizada ou solução de isomaltulose (40 kg isomaltulose/100 kg de água deionizada). A razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra foi de 4:1 (m/m) (AZOUBEL *et al.*, 2010; DA SILVA *et al.*, 2016; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; MEDEIROS *et al.*, 2016; WIKTOR *et al.*, 2019). Isomaltulose comercial (palatinose) (Beneo, Mannheim, Alemanha) foi utilizada para o preparo da solução osmótica.

No pré-tratamento ultrassônico (US), as amostras foram submetidas à energia ultrassônica em um banho ultrassônico (Modelo 03502, Quimis, São Paulo, Brasil), com tempos de imersão determinados em estudos preliminares. As condições experimentais aplicadas foram potência de 70 W, frequência de 40 kHz e temperatura de execução de 25.0 ± 3.0 °C. A potência volumétrica do ultrassom foi de 7.907 ± 0.658 W/L, determinada pelo método calorimétrico (LA FUENTE.; TADINI, 2018). Após o tempo de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres e tiveram a água da sua superfície seca com papel absorvente.

Tabela 1 - Delineamento experimental dos pré-tratamentos aplicados no estudo.

| Código | Frequência de Ultrassom (kHz) | Concentração da solução de isomaltulose (m/m) | Tempo de imersão (min) |
|---------------|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| US 20 | 40 | 0 | 20 |
| US 30 | 40 | 0 | 30 |
| OD 60 | 0 | 40% | 60 |
| USOD 20 | 40 | 40% | 20 |
| USOD 30 | 40 | 40% | 30 |
| USOD 40 | 40 | 40% | 40 |

Fonte: Da autora (2022).

Para o processo de desidratação osmótica, as amostras foram imersas em soluções concentradas de isomaltulose em temperatura ambiente (23.2 °C) e sem agitação. Após 60 minutos as amostras foram removidas do processo osmótico, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de solução, pesadas e avaliadas quanto ao teor de umidade e sólidos solúveis. Quando assistido por ultrassom, o processo osmótico (USOD) foi executado com equipamento nas mesmas condições aplicadas ao pré-tratamento US. Previamente ao processo osmótico, a solução de isomaltulose foi caracterizada quanto a suas propriedades físico-químicas. A densidade foi mensurada por meio de um picnômetro em temperatura ambiente e a viscosidade foi avaliada por meio de viscosímetro rotativo (Modelo Q860A21, Quimis, São Paulo, Brasil) utilizando um sensor cilíndrico concêntrico. Foram obtidos os seguintes valores: 29.0 ± 0.6 °Brix, pH de 7.55 ± 0.11 , densidade de 1110 kg/m^3 e viscosidade de $3.1 \pm 0.4 \text{ mPa.s}$.

A massa e o teor de umidade das amostras foram utilizados para calcular as variáveis respostas do experimento: perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG), conforme as equações 1 e 2, respectivamente. (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

$$WL(\%) = \frac{w_i \cdot x_i - w_f \cdot x_f}{w_i} \cdot 100 \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{w_f \cdot x_{sf} - w_i \cdot x_{si}}{w_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que w_i é a massa inicial da amostra (kg), x_i é o teor de umidade inicial da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), w_f é a massa final da amostra, x_f é o teor de umidade final da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), x_{sf} é o teor de sólidos totais final da amostra (kg sólido/kg) e x_{si} é o teor de sólidos totais inicial da amostra (kg/kg bs). Todos os experimentos foram realizados em triplicata e os valores apresentados são baseados nas médias encontradas.

2.3 Secagem por infravermelho

Após a realização dos tratamentos, as fatias de banana foram dispostas em bandejas de alumínio (diâmetro de 110 mm) e posteriormente secas. A secagem das amostras controle e pré-tratadas foi realizada em um secador com fonte de radiação infravermelha (Modelo IV 2500, Gehaka, São Paulo, Brasil) à temperatura de 70 °C por 360 minutos. O equipamento contém uma balança com precisão de 0.001 g e um sistema automático de coleta de dados. A fonte de radiação, com potência de infravermelho de 300 W, foi localizada a uma distância fixa de aproximadamente 15 mm das amostras.

O teor de umidade das amostras durante o processo de secagem foi determinado gravimetricamente a partir do teor de umidade inicial da amostra (antes do processo de secagem) e a sua massa em cada intervalo de tempo. A cinética de secagem foi estudada observando-se as curvas de secagem para cada condição determinada. Todos os experimentos de secagem foram realizados com três repetições.

2.3.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem foi determinada a partir do teor de umidade das amostras (em base seca), conforme a Eq. 3 (SADEGHI; HAGHIGHI ASL; MOVAGHARNEJAD, 2020).

$$DR = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

Em que DR é a taxa de secagem (kg H₂O/kg sólido seco . min), X_t e $X_{t+\Delta t}$ são respectivamente o teor de umidade (kg de H₂O/kg d.b.) no tempo t e t + Δt, t é o tempo de secagem (min) e Δ é o intervalo de tempo (min).

2.3.2 Modelagem matemática

Os dados experimentais obtidos nas secagens foram ajustados utilizando seis diferentes equações de secagem em camada delgada (TABELA 2). A razão de umidade (MR) das amostras durante os experimentos foi calculada usando a Eq. 4:

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

em que X_t , X_0 e X_{eq} representam o teor de umidade durante a secagem, teor de umidade inicial e teor de umidade de equilíbrio (kg H₂O/kg d.b.), respectivamente (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Ademais, como o valor do teor de umidade de equilíbrio (X_{eq}) é muito menor que o valor do teor de umidade inicial (X_0) e dos teores de umidade ao longo da secagem (X_t), assume-se que tal valor é próximo a 0 nas condições de secagem estudadas.

Tabela 2 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada.

| Modelo | Equação | Referência |
|------------------------------|--|---|
| Henderson & Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | Henderson e Pabis (1961) |
| Logarítmico | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ | Akpinar, Bicer e Yildiz (2003) |
| Midilli | $MR = -\exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ | Abbaspour-Gilandeh, Kaveh e Jahanbakhshi (2019) |
| Newton | $MR = \exp(-k \cdot t)$ | Lewis (1921) |
| Page | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$ | Page (1949) |
| Wang & Singh | $MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$ | Wang e Singh (1978) |

Em que: MR é a razão de umidade (adimensional), t é o tempo de secagem (min), a, b, n e k são constantes empíricas e coeficientes nas equações de secagem.

Fonte: Da autora (2022).

2.3.3 Difusividade efetiva

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de difusão unidirecional para estimar a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A segunda lei de Fick para a difusão unidirecional foi aplicada (Eq. 5).

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot (D_{eff} \cdot \frac{\partial X_t}{\partial z}) \quad (5)$$

Em que X é a umidade (kg H₂O/kg d.b.) no tempo t, D_{eff} é a difusividade efetiva (m² s⁻¹), z é uma coordenada geral (m) e t é a denotação de tempo (s). Considerando o formato e dimensão das fatias de banana, é possível assumir que não haverá difusão nas direções angular e radial e, assim, a amostra pode ser considerada como uma placa de espessura 2L. Para tal geometria, o valor de D_{eff} pode ser determinado conforme a Eq. 6.

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} 1/(2i + 1)^2 \cdot \exp(-(2i + 1)^2 \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}) \right) \quad (6)$$

Em que MR é o conteúdo de água adimensional e L é o comprimento característico (metade da espessura) (m). A condição inicial é uma quantidade inicial uniforme de água ou sólido, X(z, 0) = X₀. As condições de contorno são a simetria de concentração, $\frac{\partial X_t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$, e o conteúdo de equilíbrio na superfície X(L, t) = X_{eq} (CORRÊA *et al.*, 2012; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

2.4 Encolhimento volumétrico

O volume (V) das amostras foi calculado a partir da espessura (l) e da média de três medidas do diâmetro (d), nos respectivos eixos coordenados, com o auxílio de um paquímetro digital calibrado (MTX – 510289, Matrix, Brasil). Três amostras foram avaliadas para cada tratamento durante a secagem. O encolhimento volumétrico foi avaliado nas direções radial (SR) e longitudinal (SL), Eq. 7 e Eq. 8, respectivamente, considerando o início e o final do processo de secagem (CORRÊA *et al.*, 2012):

$$SR = \frac{d_0 - d}{d_0} \quad (7)$$

$$SL = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (8)$$

O coeficiente de encolhimento (SC) também foi determinado, conforme a Eq. 9 (CORRÊA *et al.*, 2012). Tal coeficiente indica o quanto a amostra teve seu volume reduzido ao longo da secagem. Para a determinação do volume, as amostras foram consideradas como um

disco. O diâmetro e a espessura das amostras foram avaliados a partir de um paquímetro digital calibrado.

$$SC = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (9)$$

O encolhimento isotrópico (SI) foi obtido a partir da relação entre o encolhimento radial e o encolhimento longitudinal, conforme apresentado na Eq. 10.

$$SI = \frac{SR}{SL} \quad (10)$$

2.5 Teor de umidade e atividade de água (a_w)

O teor de umidade das amostras secas foi determinado gravimetricamente em estufa a vácuo a 70 °C até peso constante (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC, 2010). A determinação da atividade de água foi realizada em um higrômetro (Aqualab, modelo 3-TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA). As análises foram realizadas em triplicata.

2.6 Análise colorimétrica

A coloração da superfície das amostras secas foi analisada a partir de um colorímetro digital (Minolta, Modelo CR-400, Osaka, Japão). As medidas foram realizadas em diferentes posições de cada amostra. O sistema de coordenadas CIELAB (L^* , a^* e b^*) foi mensurado com iluminante D65 (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Os valores do Chroma (C^*) e tonalidade (H°) foram calculados de acordo com a Eq. 11 e a Eq.12, respectivamente.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (11)$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (12)$$

2.7 Capacidade de reidratação

A avaliação da capacidade de absorção de água das amostras secas foi determinada por meio da capacidade de reidratação (RC). As amostras secas (aproximadamente 1 g) foram imersas em 150 mL de água deionizada a 25 ± 2 °C. Após 135 minutos de imersão, as amostras foram removidas da água, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água e pesadas. A variação da massa das amostras foi utilizada para a avaliação do processo de reidratação, conforme a Eq. 13 (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Todos os testes foram realizados em quadruplicata e os valores médios foram utilizados para os cálculos.

$$RC = \frac{\text{massa das amostras reidratadas}}{\text{massa das amostras secas}} \quad (13)$$

2.8 Análise estatística

Os parâmetros e constantes das equações empíricas foram estimados, correlacionando-se os modelos matemáticos aos dados experimentais, com o uso da regressão não linear pelo método Quase-Newton ao nível de 5% de significância, pelo *software* Statistica7.0® (StatSoft Inc., Tulsa, OK). A avaliação dos modelos aplicados foi baseada no maior coeficiente de determinação (R^2) e no menor valor do desvio médio relativo (E%) (Eq. 14), em que m_i é o valor experimental, m_p é o valor previsto e N é o tamanho da amostra. Outros parâmetros estatísticos como a soma do erro quadrático (SSE) (Eq. 15) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (Eq. 16) também foram utilizados para avaliar e comparar a qualidade do ajuste.

$$E (\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad (14)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \quad (15)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \right]^{1/2} \quad (16)$$

Para a avaliação dos resultados das análises qualitativas, aplicou-se ANOVA, seguida do teste de Tukey, ambos considerando um nível de significância de 5%. As análises foram realizadas utilizando-se o *software* Sisvar 5.8 (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos pré-tratamentos

O efeito dos pré-tratamentos aplicados na perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e umidade final (X) das amostras está apresentado na Tabela 3. Durante os pré-tratamentos de US as amostras perderam sólidos e ganharam água (sinal negativo). Tal resultado é devido à água deionizada ser bastante hipotônica com relação ao alimento, com geração de gradientes de concentração entre os dois meios que favorecem o transporte de sólidos do fruto para a água e a transferência de água do meio para o fruto. Como consequência de tal comportamento, o teor de umidade final das amostras aumentou em 47.01% e 52.08% com a aplicação de US por 20 e 30 minutos, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos (AZOUBEL *et al.*, 2010, 2015; DA SILVA *et al.*, 2016; FERNANDES; RODRIGUES, 2007; WANG *et al.*, 2018).

A utilização de energia ultrassônica (US) promoveu a retirada de solutos nativos da fruta (TABELA 3). Tal comportamento é importante, pois demonstra que a tecnologia ultrassônica é eficiente na remoção de açúcares e sólidos de diversas frutas, podendo ser aplicada na produção de alimentos com reduzido teor calórico (AZOUBEL *et al.*, 2015; DA SILVA *et al.*, 2016; FERNANDES; RODRIGUES, 2012). Durante a ação do ultrassom, as amostras são submetidas a um ciclo de alternância de compressão e expansão, que pode resultar na formação de microcanais, ocasionando a perda de água e solutos das fatias da fruta para o meio líquido (AZOUBEL *et al.*, 2015; FERNANDES; GALLÃO; RODRIGUES, 2008). Além disto, observa-se que tanto os valores de WL quanto os de SG aumentaram com o aumento do tempo de ultrassom nos pré-tratamentos. Especialmente na USOD, o aumento desses valores indica que o uso da tecnologia potencializa os processos de transferência de massa. Resultado semelhante foi observado em estudo com *cranberries* (NOWACKA *et al.*, 2018) e em estudos com kiwi, nos quais o aumento de WL e SG foi atribuído à cavitação, que aumenta a permeabilidade celular e acelera a difusão molecular (FAN *et al.*, 2020; NOWACKA *et al.*, 2014).

O processo osmótico, com o uso de isomaltulose, resultou em ganho de sólidos pela fruta e perda de água da fruta para o meio. A perda de água pelas fatias de banana já era esperada, uma vez que a aplicação de soluções hipertônicas resulta em um alto gradiente de concentração, aumentando os processos de transferência de massa. Também foi observado que o percentual de perda de água foi maior que o de ganho de solutos para o tratamento OD 60. O

comportamento é decorrente da seletividade da membrana celular, que permite o transporte de moléculas menores, como a água, mas restringe o transporte de moléculas maiores, como a da isomaltulose (DA SILVA *et al.*, 2016).

Durante o processo osmótico, algumas variáveis influenciam no ganho de solutos e perda de água pelas amostras, como o tempo de processo e a concentração da solução osmótica. Tradicionalmente, condições otimizadas de processo são aquelas que resultam em maior perda de água e menor ganho de sólidos. Porém, do ponto de vista nutricional e sensorial, uma menor incorporação de sólidos na desidratação osmótica é interessante (DA SILVA *et al.*, 2016). Além disto, como o processo osmótico não demanda a utilização de altas temperaturas nem equipamentos específicos, pode representar uma interessante alternativa de impregnação de solutos de baixo valor calórico, como a isomaltulose, em frutas e vegetais.

Tabela 3 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação de pré-tratamentos.

| Tratamento | WL (%) | SG (%) | X (kg H₂O/kg d.b.) |
|-------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|
| US 20 | -14.565 ± 1.474 | -2.316 ± 0.368 | 3.990 ± 0.102 |
| US 30 | -17.517 ± 1.346 | -2.974 ± 0.317 | 4.147 ± 0.237 |
| OD 60 | 5.155 ± 0.922 | 4.068 ± 0.922 | 2.377 ± 0.106 |
| USOD 20 | 1.067 ± 0.316 | 1.520 ± 0.129 | 2.457 ± 0.096 |
| USOD 30 | 2.390 ± 0.586 | 3.446 ± 0.242 | 2.432 ± 0.275 |
| USOD 40 | 2.916 ± 0.421 | 3.739 ± 0.174 | 2.409 ± 0.065 |

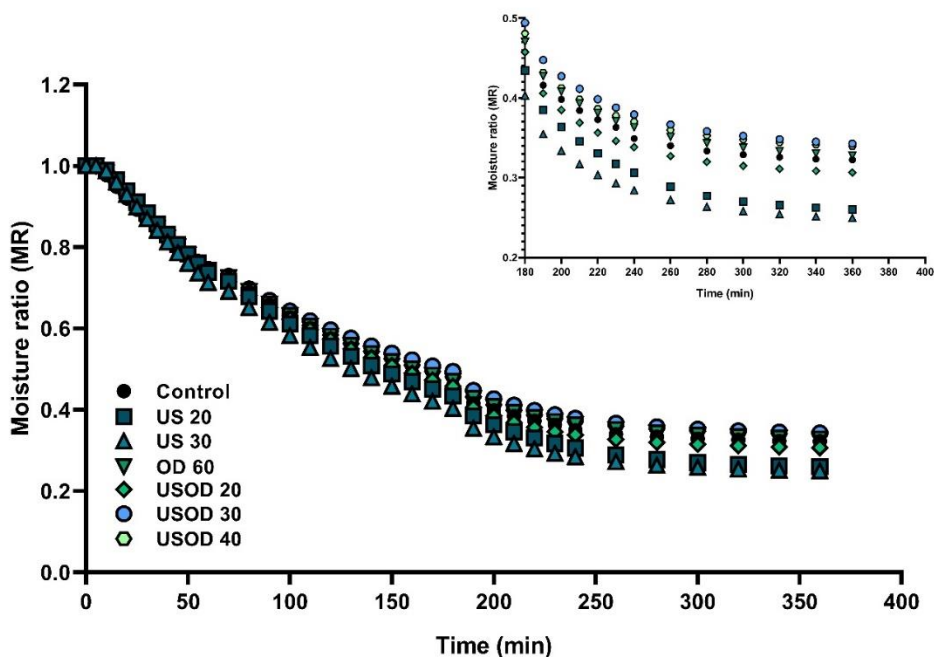
Média de três repetições ± desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

3.2 Cinética de secagem

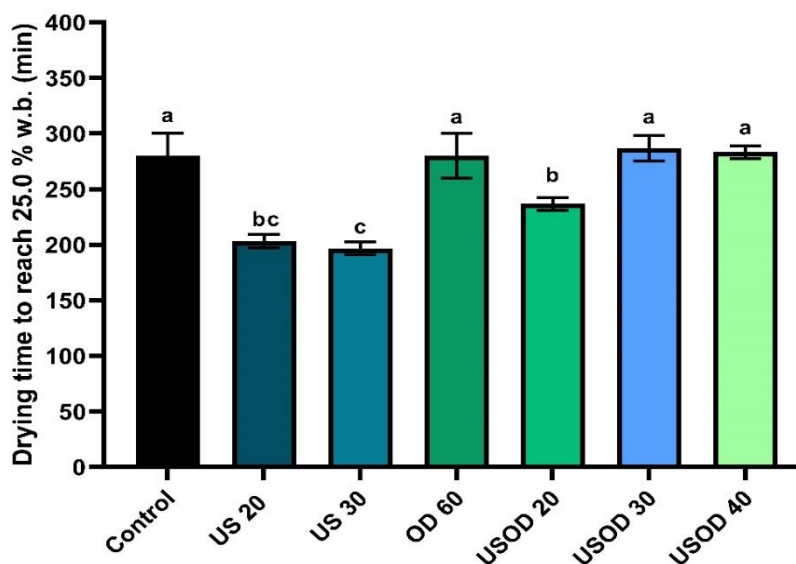
Objetivando-se avaliar a influência dos pré-tratamentos selecionados na cinética de secagem por infravermelho das fatias de banana, o teor de umidade adimensional (MR) e sua variação durante o processo de secagem é representado na Figura 2. Os tempos médios de secagem que amostras gastaram para atingir um teor de umidade de 25% (w.b.) estão apresentados na Figura 3.

Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem por infravermelho de fatias de banana submetidas a diferentes pré-tratamentos.



Fonte: Da autora (2022).

Figura 3 - Tempo médio de secagem para atingir 25% de umidade (base úmida) de bananas (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) com e sem a aplicação de pré-tratamentos.



Mesma letra sobre as colunas indica não diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Pela inspeção da Figura 2, vê-se que o teor de umidade das amostras diminuiu com o tempo de secagem, apresentando um decaimento exponencial. No estágio inicial, o processo é

controlado principalmente pelo mecanismo de difusão, com a razão de umidade caindo rapidamente, até que, gradualmente, o teor de umidade de equilíbrio seja atingido (GU *et al.*, 2022; KHAWAS *et al.*, 2015). É possível observar que, de maneira geral, a imersão em água assistida por ultrassom como pré-tratamento acelerou o processo de secagem das amostras quando comparado ao controle e amostras tratadas por desidratação osmótica. Comparadas com as amostras controle, as fatias de banana tratadas com ultrassom tiveram seus tempos de secagem reduzidos em 27.38% e 29.76%, para os tratamentos US 20 e US 30, respectivamente. Na secagem por infravermelho de fatias de pera, o pré-tratamento ultrassônico conferiu menores tempos de secagem, resultando em um produto seco com menor perda de qualidade (DUJMIĆ *et al.*, 2013). Resultados similares foram observados em secagem convectiva de cenouras (WANG *et al.*, 2018), mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015), gengibre (OSAE *et al.*, 2019) e bananas (FERNANDES; RODRIGUES, 2007). Em uma imersão em água com banho ultrassônico, a estrutura celular é desintegrada, seja devido à energia ultrassônica quanto ao transporte de água para dentro da estrutura celular. Essa desintegração da microestrutura celular facilita a difusão de água durante o processo de secagem posterior (OSAE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2018).

O uso de OD como pré-tratamento na secagem por infravermelho de fatias de banana não resultou em tempos médios de secagem reduzidos quando comparado com as amostras controle. A aplicação do processo osmótico em tempos superiores a 20 minutos, independentemente da aplicação de ultrassom, resultou em maiores tempos médios de secagem e MR superiores. Esse resultado pode ser decorrente da formação de uma camada de isomaltulose na superfície da fruta após o processo osmótico, que pode ter dificultado o fluxo de água, reduzindo a difusividade e aumentando, conseqüentemente, o tempo de secagem (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017). Resultado semelhante foi observado em estudos de desidratação osmótica de cogumelos (KAUR; KUMAR; ALAM, 2014), pimentão (ODEWOLE; OLANIYAN, 2016), cenoura (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017), banana (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012), morango (MACEDO *et al.*, 2022) e mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015).

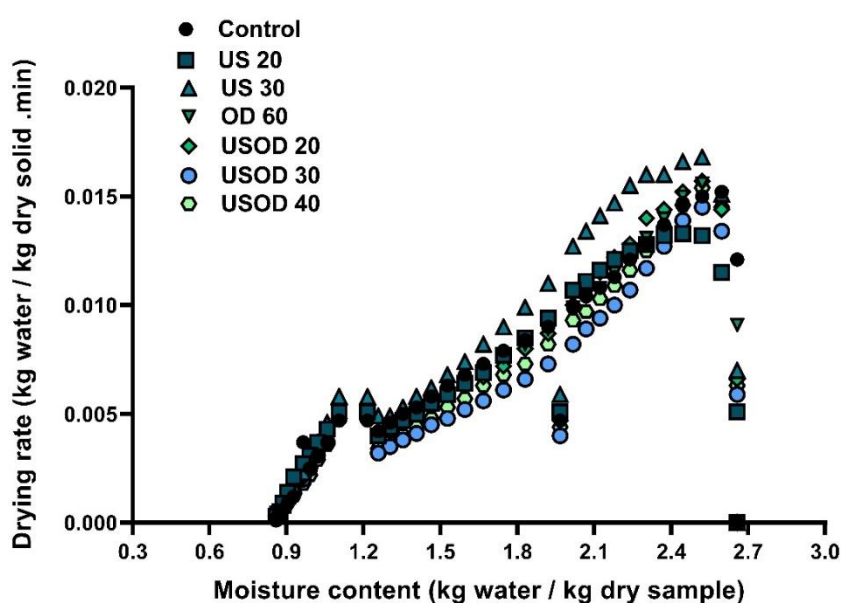
3.3 Taxa de secagem (DR)

A taxa de secagem das amostras submetidas aos diferentes pré-tratamentos é apresentada na Figura 4. No período inicial da secagem, as fatias de banana apresentaram

elevado teor de umidade, promovendo altos valores de DR. Como a umidade das amostras é reduzida significativamente ao longo do tempo, a DR decai, devido à dificuldade de remoção da água (GU *et al.*, 2022; MACEDO *et al.*, 2021). Ademais, períodos de secagem com valores de DR menores indicam que a superfície do produto não está mais saturada com água e, assim, a DR é controlada pela difusão da umidade do interior do alimento para a superfície (JEEVARATHINAM *et al.*, 2021). Um importante ponto a ser destacado é que como a energia infravermelha penetra diretamente na camada interna do alimento, é mais absorvida pelas moléculas, sendo convertida em energia térmica e conseqüentemente aumentando a DR. Essa é uma das principais vantagens da tecnologia, pois evita a perda de energia e preserva a qualidade do produto (GU *et al.*, 2022; WU; ZHANG; LI, 2019).

Entre os pré-tratamentos avaliados, destacou-se a DR das amostras US 30, apresentando os maiores valores durante todo o processo. Menores valores de DR foram observados para amostras submetidas ao tratamento osmótico, especialmente os tratamentos USOD 30 e USOD 40. Macedo *et al.* (2021) relataram que a incorporação de solutos durante os processos osmóticos aumenta as interações da água com o alimento, dificultando o escoamento e difusão da água. Shi *et al.* (2020) citaram que monossacarídeos presentes na banana podem propiciar a formação de ligações de hidrogênio entre as moléculas de água livre e grupos hidroxila. Para a quebra dessas ligações, maior tempo de processo e maior quantidade de energia é necessária, o que resulta em taxas de secagem reduzidas.

Figura 4 - Taxa de secagem de fatias de banana pré-tratadas em função do seu teor de umidade.



Fonte: Da autora (2022).

3.4 Modelagem matemática

Para a modelagem matemática, os teores de umidade experimentais (em base seca) ao longo do processo de secagem foram convertidos para os valores de MR e ajustados em relação ao tempo. Seis modelos empíricos de secagem em camada delgada foram comparados. Os parâmetros de ajustes, constantes e critérios de comparação dos modelos matemáticos aplicados estão apresentados na Tabela 4. Todos os modelos matemáticos relacionados aos dados experimentais apresentaram bom ajuste, apresentando valores elevados de R^2 e menores valores de SSE, E (%) e RMSE, que indicam maior confiabilidade do modelo. Os seis modelos matemáticos obtiveram valores de R^2 variando de 0.986 a 0.999, valores de SSE baixos (< 0.001), E (%) inferiores a 6.475 e reduzidos valores de RMSE (< 0.051). Considerando bananas verdes (LA FUENTE; TADINI, 2018) e maduras (BAPTESTINI *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2020; TUNCKAL; DOYMAZ, 2020), a modelagem matemática mostrou-se similar, destacando-se a aplicação do modelo empírico de Midilli.

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana, sem tratamento (Controle) e submetidas aos pré-tratamentos US 20, US 30, OD 60, USOD 20, USOD 30 e USOD 40 (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R^2 | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|-------|-------|----------------------|-------|
| Controle | | | | | |
| Page | $k = 0.008; n = 0.868$ | 0.994 | 0.618 | 6×10^{-4} | 0.025 |
| Newton | $k = 0.004$ | 0.989 | 0.917 | 0.001 | 0.033 |
| Logarítmico | $a = 0.788; b = 0.007; k = 0.234$ | 0.998 | 0.092 | 1.8×10^{-4} | 0.013 |
| Wang & Singh | $a = -0.004; b = 7 \times 10^{-6}$ | 0.999 | 0.043 | 1.6×10^{-4} | 0.011 |
| Henderson & Pabis | $a = 0.978; k = 0.004$ | 0.990 | 1.025 | 0.001 | 0.032 |
| Midilli | $k = 0.004; n = 1.086; b = 6 \times 10^{-4}$ | 0.999 | 0.035 | 2×10^{-4} | 0.011 |
| US 20 | | | | | |
| Page | $k = 0.005; n = 0.972$ | 0.996 | 0.920 | 6×10^{-4} | 0.024 |
| Newton | $k = 0.005$ | 0.995 | 1.092 | 6×10^{-4} | 0.024 |
| Logarítmico | $a = 0.893; b = 0.007; k = 0.144$ | 0.998 | 0.102 | 2.2×10^{-4} | 0.015 |
| Wang & Singh | $a = -0.005; b = 7 \times 10^{-6}$ | 0.998 | 6.475 | 0.002 | 0.051 |
| Henderson & Pabis | $a = 1.010; k = 0.005$ | 0.996 | 1.094 | 6×10^{-4} | 0.024 |
| Midilli | $k = 0.003; n = 1.154; b = 5 \times 10^{-4}$ | 0.999 | 0.002 | 2×10^{-4} | 0.013 |

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana, sem tratamento (Controle) e submetidas aos pré-tratamentos US 20, US 30, OD 60, USOD 20, USOD 30 e USOD 40 (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|----------------------|--------------|------------------------|-------------|
| US 30 | | | | | |
| Page | k = 0.007; n = 0.945 | 0.995 | 1.114 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.027 |
| Newton | k = 0.005 | 0.999 | 1.565 | 8 x 10 ⁻⁴ | 0.028 |
| Logarítmico | a = 0.881; b = 0.007; k = 0.157 | 0.998 | 0.126 | 2.4 x 10 ⁻⁴ | 0.015 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 8 × 10 ⁻⁶ | 0.998 | 0.153 | 2.1 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |
| Henderson & Pabis | a = 1.004; k = 0.005 | 0.994 | 1.578 | 8 x 10 ⁻⁴ | 0.028 |
| Midilli | k = 0.003; n = 1.142; b = 5×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.003 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.013 |
| OD 60 | | | | | |
| Page | k = 0.008; n = 0.865 | 0.994 | 0.621 | 6 x 10 ⁻⁴ | 0.025 |
| Newton | k = 0.004 | 0.988 | 0.851 | 0.001 | 0.034 |
| Logarítmico | a = 0.779; b = 0.007; k = 0.244 | 0.998 | 0.078 | 1.7 x 10 ⁻⁴ | 0.013 |
| Wang & Singh | a = - 0.004; b = 7 × 10 ⁻⁶ | 0.999 | 0.030 | 1.5 x 10 ⁻⁴ | 0.012 |
| Henderson & Pabis | a = 0.978; k = 0.004 | 0.989 | 0.981 | 0.001 | 0.032 |
| Midilli | k = 0.004; n = 1.080; b = 6×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.006 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.012 |
| USOD 20 | | | | | |
| Page | k = 0.008; n = 0.892 | 0.994 | 0.670 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.026 |
| Newton | k = 0.004 | 0.991 | 1.014 | 0.001 | 0.032 |
| Logarítmico | a = 0.813; b = 0.007; k = 0.215 | 0.998 | 0.130 | 2.5 x 10 ⁻⁴ | 0.016 |
| Wang & Singh | a = - 0.004; b = 7 × 10 ⁻⁶ | 0.998 | 0.003 | 2.1 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |
| Henderson & Pabis | a = 0.986; k = 0.004 | 0.991 | 1.063 | 9.7 x 10 ⁻⁴ | 0.031 |
| Midilli | k = 0.004; n = 1.097; b = 6×10 ⁻⁴ | 0.998 | 0.033 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.015 |
| USOD 30 | | | | | |
| Page | k = 0.009; n = 0.849 | 0.994 | 0.522 | 6 x 10 ⁻⁴ | 0.024 |
| Newton | k = 0.004 | 0.987 | 0.617 | 0.001 | 0.034 |
| Logarítmico | a = 0.760; b = 0.007; k = 0.259 | 0.998 | 0.086 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |
| Wang & Singh | a = - 0.004; b = 7 × 10 ⁻⁶ | 0.998 | 0.117 | 2.3 x 10 ⁻⁴ | 0.015 |
| Henderson & Pabis | a = 0.974 k = 0.004 | 0.989 | 0.825 | 0.001 | 0.032 |
| Midilli | k = 0.004; n = 1.047; b = 6×10 ⁻⁴ | 0.998 | 0.013 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |

Tabela 4 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana, sem tratamento (Controle) e submetidas aos pré-tratamentos US 20, US 30, OD 60, USOD 20, USOD 30 e USOD 40 (Conclusão).

| Modelo | Parâmetros | R ² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|----------------|-------|------------------------|-------|
| USOD 40 | | | | | |
| Page | k = 0.009; n = 0.849 | 0.993 | 0.595 | 7 x 10 ⁻⁴ | 0.026 |
| Newton | k = 0.004 | 0.986 | 0.769 | 0.001 | 0.036 |
| Logarítmico | a = 0.762; b = 0.007; k = 0.262 | 0.998 | 0.091 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |
| Wang & Singh | a = - 0.004; b = 7 × 10 ⁻⁶ | 0.998 | 0.060 | 2.1 x 10 ⁻⁴ | 0.014 |
| Henderson & Pabis | a = 0.974 k = 0.004 | 0.987 | 0.941 | 0.001 | 0.034 |
| Midilli | k = 0.004; n = 1.070; b = 6×10 ⁻⁴ | 0.998 | 0.015 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.013 |

Em que: a, b, n são os parâmetros e k a constante dos modelos matemáticos.

Fonte: Da autora (2022).

3.5 Difusividade efetiva (D_{eff})

Dado a importância do processo de difusão na secagem por infravermelho, o coeficiente de difusividade de água de Fick (D_{eff}) foi calculado e está apresentado na Tabela 5. Os valores de D_{eff} obtidos para as fatias de banana variaram de 1.10 × 10⁻¹¹ a 1.63 × 10⁻¹¹, estando comparáveis aos valores relatados na literatura para banana desidratada (AZOUBEL *et al.*, 2010; CORRÊA *et al.*, 2012; GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022; KHAWAS *et al.*, 2015; LA FUENTE; TADINI, 2018; MACEDO *et al.*, 2020; TAKOUGNADI; BOROZE; AZOUMA, 2020; TUNCKAL; DOYMAZ, 2020).

Tabela 5 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras secas.

| Tratamento | D _{eff} × 10 ¹¹ (m ² s ⁻¹) | R ² |
|------------|---|----------------|
| Controle | 1.26 ± 0.08 | 0.964 |
| US 20 | 1.47 ± 0.06 | 0.966 |
| US 30 | 1.63 ± 0.09 | 0.969 |
| OD 60 | 1.19 ± 0.02 | 0.858 |
| USOD 20 | 1.23 ± 0.06 | 0.971 |
| USOD 30 | 1.10 ± 0.05 | 0.972 |
| USOD 40 | 1.12 ± 0.06 | 0.972 |

Em que: D_{eff} é coeficiente de difusividade de Fick; R² é o coeficiente de correlação. Média de três repetições ± desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

As fatias de banana, imersas em água e submetidas à energia ultrassônica (US 20 e US 30), apresentaram maior valor de D_{eff} quando comparadas ao tratamento controle e demais tratamentos (TABELA 5), possivelmente devido à desestabilização celular resultante da cavitação. Quando aplicado em bananas imaturas, o ultrassom resultou em um aumento de 4.8% na difusividade efetiva de umidade (LA FUENTE; TADINI, 2018). Em mamão, o aumento na difusividade pelo uso de US foi associado à formação de microcanais, que facilita a movimentação das moléculas de água para a superfície da fruta (AZOUBEL *et al.*, 2015). Ao ser associado ao etanol como pré-tratamento, o ultrassom promoveu maiores valores de difusividade em bananas, apresentando uma tendência crescente com o aumento do tempo de tratamento (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022). Em caquis, a desidratação osmótica assistida por ultrassom promoveu uma redução significativa no tempo de secagem, resultando em um aumento de até 21% nos valores de difusividade efetiva (BOZKIR *et al.*, 2019).

Amostras pré-tratadas por desidratação osmótica, com e sem a assistência de ultrassom, apresentaram menores valores de difusividade (TABELA 5). Isso pode ser explicado pelas mudanças físicas e químicas nas fatias de banana durante a incorporação de isomaltulose, que resultam em diferentes taxas de secagem e conseqüente reduzido valor de difusividade. O processo osmótico promove uma saturação da superfície das amostras com moléculas de soluto, criando uma resistência extra para os processos de transferência de calor e massa (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; AZOUBEL *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2022). Macedo *et al.* (2021) também observaram que amostras que tiveram incorporação de isomaltulose apresentaram uma tendência de demanda por maior tempo de secagem. Os autores correlacionaram isso com a maior incorporação de soluto durante processos osmóticos, aumentando a quantidade e a força das ligações de água com o alimento, dificultando a perda de umidade.

3.6 Encolhimento volumétrico

Tabela 6 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas por infravermelho.

| Código | SR | SL | SC | SI |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Controle | 0.165 ± 0.047 ^a | 0.389 ± 0.126 ^{ab} | 0.566 ± 0.142 ^a | 0.429 ± 0.028 ^b |
| US 20 | 0.189 ± 0.023 ^a | 0.373 ± 0.111 ^{ab} | 0.585 ± 0.091 ^a | 0.531 ± 0.133 ^{ab} |
| US 30 | 0.213 ± 0.045 ^a | 0.498 ± 0.050 ^a | 0.691 ± 0.011 ^a | 0.437 ± 0.140 ^b |
| OD 60 | 0.169 ± 0.022 ^a | 0.263 ± 0.040 ^b | 0.490 ± 0.043 ^a | 0.652 ± 0.110 ^{ab} |
| USOD 20 | 0.175 ± 0.061 ^a | 0.296 ± 0.063 ^{ab} | 0.515 ± 0.113 ^a | 0.579 ± 0.091 ^{ab} |
| USOD 30 | 0.175 ± 0.045 ^a | 0.218 ± 0.093 ^b | 0.462 ± 0.123 ^a | 0.855 ± 0.191 ^a |
| USOD 40 | 0.203 ± 0.044 ^a | 0.298 ± 0.057 ^{ab} | 0.551 ± 0.083 ^a | 0.682 ± 0.032 ^{ab} |

Média de três repetições ± desvio padrão. Onde SR representa encolhimento radial, SL o encolhimento longitudinal, SC o coeficiente de encolhimento e SI o encolhimento isotrópico. Mesma letra nas colunas indica ausência de diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Importante parâmetro de alimentos desidratados, o encolhimento é uma alteração física inerente ao processo de secagem e as condições aplicadas (MACEDO *et al.*, 2022). A perda de água juntamente com a temperatura elevada causa estresse ao tecido celular, alterando sua microestrutura e promovendo o seu encolhimento (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017; PEI *et al.*, 2021). A partir dos dados apresentados na Tabela 6, é possível observar que o encolhimento longitudinal foi maior que o encolhimento radial. Comportamento semelhante foi observado em estudo de secagem convectiva de bananas verdes e maduras (CORRÊA *et al.*, 2012; PUANGSUWAN *et al.*, 2021; SEYEDABADI; KHOJASTEHPOUR; ABBASPOUR-FARD, 2017). Segundo os autores, tal comportamento é esperado, pois a transferência de massa ocorre na direção longitudinal, devido à posição da fonte de calor.

As amostras tratadas por OD, com e sem o auxílio de ultrassom, apresentaram maiores valores de encolhimento isotrópico (SI). Tal comportamento pode ser atribuído à umidade removida e ao estresse celular sofrido decorrente do processo osmótico e posterior secagem (THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011). Como resultado da redução do tempo total de secagem, amostras US 30 apresentaram maior integridade das paredes celulares e menor retração, apresentando menores valores de SI comparadas com as amostras tratadas com outros métodos. Com a aplicação da energia ultrassônica, a microestrutura celular fica mais porosa, possibilitando maior difusão de água e rápida remoção de umidade em direção à superfície. Também, é importante destacar que a rápida evaporação da água desencadeada pela secagem pode criar um grande fluxo de vapor na superfície, o que ajuda a prevenir o colapso do tecido celular e o encolhimento (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; ZHAO *et al.*, 2019).

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

Tabela 7 - Teor de umidade final (em base seca), atividade de água (a_w) e parâmetros de cor de fatias de banana secas por infravermelho.

| Código | X_f | a_w | Parâmetros de cor | | | | |
|----------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | | a^* | b^* | C^* | L^* | H° |
| Controle | 0.220± 0.020 ^a | 0.548± 0.005 ^a | 6.391 ±1.187 ^{ab} | 20.699 ±2.428 ^{ab} | 21.692 ±2.168 ^{ab} | 52.571 ±4.816 ^a | 72.822 ±4.257 ^a |
| US 20 | 0.240± 0.040 ^a | 0.545 ±0.009 ^a | 6.192 ±1,101 ^{ab} | 23.916 ±4.978 ^{ab} | 26.761 ±9.752 ^a | 52.736 ±3.989 ^a | 75.133 ±3.436 ^a |
| US 30 | 0.230± 0.070 ^a | 0.558± 0.006 ^a | 7.107 ±0.744 ^a | 24.791 ±3.077 ^a | 25.839 ±2.814 ^{ab} | 53.883 ±3.253 ^a | 73.800 ±3.042 ^a |
| OD 60 | 0.210± 0.020 ^a | 0.561± 0.005 ^a | 6.333 ±1.104 ^{ab} | 23.714 ±4.592 ^{ab} | 24.588 ±4.433 ^{ab} | 55.362 ±4.016 ^a | 74.689 ±3.691 ^a |
| USOD 20 | 0.170± 0.050 ^a | 0.555± 0.016 ^a | 6.429 ±2.133 ^{ab} | 20.272 ±1.981 ^{ab} | 21.163 ±1.729 ^{ab} | 56.618 ±7.034 ^a | 74.056 ±5.793 ^a |
| USOD 30 | 0.130± 0.060 ^a | 0.541± 0.011 ^a | 5.017 ±1.721 ^b | 18.947 ±2.582 ^b | 19.636 ±2.797 ^b | 58.281 ±8.008 ^a | 75.489 ±4.044 ^a |
| USOD 40 | 0.190± 0.070 ^a | 0.538± 0.010 ^a | 5.174 ±1.566 ^{ab} | 20.674 ±3.423 ^{ab} | 21.873 ±3.516 ^{ab} | 57.308 ±7.188 ^a | 75.678 ±6.336 ^a |

Onde: X_f é o teor de umidade final (kg H₂O/kg amostra d.b.); a_w representa atividade de água; e a^* , b^* , C^* , L^* , H° são parâmetros de cor. Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

3.7 Teor de umidade final e atividade de água (a_w)

O teor de umidade final das amostras variou entre 0.130 a 0.240 kg H₂O/kg d.b, sem diferença estatística ($p < 0.05$) entre os tratamentos (TABELA 7). Ademais, observa-se que fatias de bananas que foram submetidas ao tratamento osmótico (OD e USOD) apresentaram menores teores de umidade final, o que é importante considerando o aspecto tecnológico e de conservação.

Embora sem diferença estatística significativa ($p < 0.05$), todos os pré-tratamentos resultaram em amostras secas com valores de a_w abaixo de 0.6 (TABELA 7). Tal dado é importante, pois alimentos com elevadas a_w são mais susceptíveis ao crescimento microbiano, e conseqüente degradação (KOWALSKI; SZADZIŃSKA, 2014; MACEDO *et al.*, 2022). Comumente, assume-se que a maior estabilidade do alimento é alcançada com reduzidos valores de a_w , que correspondem ao teor de água na monocamada (BIALIK *et al.*, 2020). Além disso, com a incorporação de isomaltulose em alguns tratamentos, a estrutura e composição celular das fatias de banana se alteraram, promovendo novas interações entre as moléculas de água e a amostra, influenciando na fugacidade da água e conseqüentemente no teor de a_w (MACEDO *et al.*, 2021). É importante destacar que o processo de OD, em alguns casos, pode resultar em produtos com a_w superiores. Isso pode estar relacionado à cristalização dos solutos, especialmente açúcares, após a secagem (BIALIK *et al.*, 2020; SETTE *et al.*, 2015). É o que foi observado em estudos com *kiwiberry* (BIALIK *et al.*, 2020), morango (PROSAPIO; NORTON, 2017), goiaba (KEK; CHIN; YUSOF, 2013) e mamão (GERMER *et al.*, 2014).

3.8 Cor

A cor dos alimentos é importante parâmetro, influenciando na sua aceitação, além de informar sobre alguns aspectos da sua qualidade e propriedades (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017; MACEDO *et al.*, 2021; OSAE *et al.*, 2019). Os valores dos parâmetros L* (brilho/luminosidade), a* (vermelho/verde), b* (amarelo/azul), C* (Chroma) e H° (tonalidade) das fatias de banana secas por infravermelho sob diferentes condições estão apresentados na Tabela 7. Os dados apresentados indicam significativa diferença ($p < 0.05$) quanto aos parâmetros de cor, inferindo que a cor das amostras foi modificada pelos pré-tratamentos aplicados. O pré-tratamento ultrassônico US 30 resultou no incremento dos parâmetros a*, b* e C*, enquanto o tratamento USOD 30 resultou em redução dos mesmos parâmetros. O aumento no valor de a*, que indica uma coloração mais avermelhada, pode ser atribuído ao

escurecimento que ocorre principalmente durante a desestabilização celular, decorrente do ultrassom. Processos não-enzimáticos, como a reação de Maillard, ocorrem durante o processo de secagem e também podem resultar na produção de pigmentos de coloração avermelhada e escuros (TUNCKAL; DOYMAZ, 2020). Valores de b^* elevados ($+ b^*$) inferem saturação da coloração amarela, enquanto valores reduzidos inferem à lixiviação e degradação de pigmentos, decorrentes do tratamento osmótico aplicado em algumas amostras (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; GERMER *et al.*, 2014). Além disso, a incorporação de isomaltulose leva à formação de uma camada de sólidos na superfície, limitando o contato entre as amostras e o oxigênio e, assim, reduzindo reações de oxidação e possível escurecimento (diminuição do parâmetro b^*) (CHAGURI *et al.*, 2017; VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014).

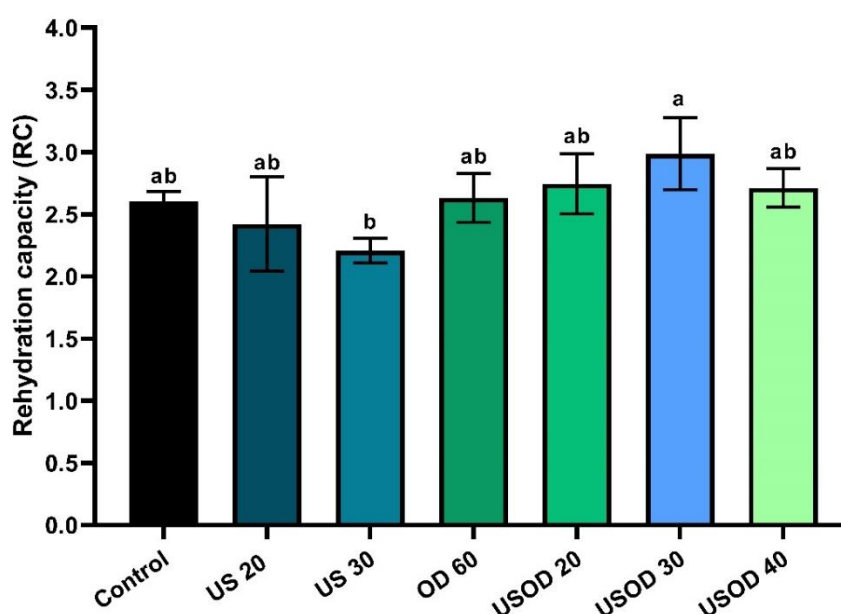
Não foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0.05$) nos valores dos parâmetros L^* e H° . Os valores do parâmetro L^* , que variaram entre 52.571 a 58.281, podem indicar amostras mais escuras, com pigmentos escuros, como as melanoidinas, formadas durante o processo de secagem (MACEDO *et al.*, 2021; PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013; TUNCKAL; DOYMAZ, 2020). Comumente, menores tempos de secagem e menores temperaturas resultam em valores de L^* mais elevados, com menor formação de compostos escuros. O processo de OD pode minimizar os danos térmicos na coloração de alimentos, prevenindo o escurecimento enzimático. Por outro lado, a utilização de soluções altamente concentradas pode causar alterações na parede celular, resultando em um aspecto indesejável no produto final (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; NOWACKA *et al.*, 2017). Ademais, algumas estratégias podem ser utilizadas para minimização da variação de coloração. Em fatias de banana, a imersão da fruta em solução de ácido cítrico previamente ao processo osmótico foi capaz de reduzir alterações excessivas de cor, minimizando o escurecimento do produto final (ATARES; GALLAGHER; OLIVEIRA, 2011). Mesmo resultado foi observado em fatias de banana desidratadas por radiação infravermelha (PAN *et al.*, 2008).

3.9 Capacidade de reidratação

Importante parâmetro na avaliação da qualidade de produtos desidratados, a capacidade de reidratação (RC) está diretamente relacionada com as condições de secagem empregadas e o seu efeito na estrutura e composição do produto (ROJAS; AUGUSTO, 2018; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). No decorrer da reidratação, o alimento submerso em água sofre diversas mudanças simultâneas, especialmente no seu conteúdo de umidade, porosidade e volume. A influência da aplicação de diferentes pré-tratamentos na capacidade de reidratação

de fatias de banana secas por infravermelho está apresentada na Figura 5. Os valores de RC das amostras variaram entre 2.208 ± 0.101 a 2.897 ± 0.288 para todas as condições de secagem estudadas. A aplicação de energia ultrassônica facilitou a remoção de água, mas também reduziu a resistência à absorção de umidade durante o processo de reidratação. Menores valores de RC foram observados para as amostras US 30 (2.208 ± 0.101) e maiores valores de RC foram observados para amostras submetidas ao processo osmótico.

Figura 5 - Capacidade de reidratação das fatias de banana secas por infravermelho submetidas a diferentes pré-tratamentos.



Mesma letra sobre as colunas indica que não há diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).
Fonte: Da autora (2022).

Comumente, é estabelecido que maiores potências de infravermelho e maiores temperaturas resultam em produtos finais com a estrutura mais porosa, o que influencia diretamente na sua capacidade de absorção de água (KOCABIYIK; TEZER, 2009; SIRIAMORNPNUN *et al.*, 2015). Além disso, é importante ressaltar que a capacidade de reidratação e a quantidade de umidade absorvida dependem do grau de degradação celular e estrutural causada pela aplicação de pré-tratamentos, como a energia ultrassônica (KROKIDA; MAROULIS, 2001; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020; ZHAO *et al.*, 2019). Embora o US cause uma rápida absorção de água pelas amostras, a retenção da água absorvida pode ser prejudicada pelo dano estrutural e a formação de microcanais (ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). Alterações estruturais podem resultar na perda da absorção de água pelas cavidades celulares, proporcionalmente à quantidade de água absorvida. Temperaturas muito

elevadas, tanto de secagem quanto de reidratação, reduzem a absorção de água devido ao colapso estrutural (AGNIESZKA; ANDRZEJ, 2010; CONTRERAS; MARTÍN-ESPARZA; MARTÍNEZ-NAVARRETE, 2011; GARCÍA-SEGOVIA; ANDRÉS-BELLO; MARTÍNEZ-MONZÓ, 2011). Frutas e vegetais desidratados de forma eficiente apresentam menor tempo de secagem, um menor encolhimento e conseqüentemente melhor reidratação (AKHIJAHANI; ARABHOSSEINI; KIANMEHR, 2017; HORUZ *et al.*, 2017). Amostras com encolhimento reduzido após o processo de secagem permitem vazios intercelulares bem definidos, promovendo uma expressiva taxa de reidratação (TAIWO; BABALOLA, 2018).

A reidratação de alimentos previamente desidratados por OD é complexa e dependente de alguns fatores. Na etapa inicial da reidratação, a camada superficial de sólidos é dissolvida, dificultando a adsorção de água no interior da amostra. Com o decorrer do processo, a estrutura celular do alimento que determinará o grau de reidratação (AGNIESZKA; ANDRZEJ, 2010; CHÁFER *et al.*, 2011). Além disto, é válido ressaltar que a desidratação osmótica afeta as propriedades de reidratação da amostra seca devido à permeabilidade e desintegração celular oriunda do estresse osmótico, reduzindo a capacidade de absorção e retenção de água das amostras (AMAMI *et al.*, 2017; NOSHAD *et al.*, 2011). Em processos osmóticos, a influência da incorporação de açúcares na absorção de água já foi observada na literatura (BAKALIS; KARATHANOS, 2005; BOZKIR *et al.*, 2019; CHÁFER *et al.*, 2011; NOSHAD *et al.*, 2011; PROSAPIO; NORTON, 2017; RODRÍGUEZ; RODRIGUEZ; MASCHERONI, 2015; TAIWO; ANGERSBACH; KNORR, 2002; ZHAO *et al.*, 2019). Cháfer *et al.* (2011) relataram em seu estudo a perda de sólidos e reduzida absorção de água das amostras tratadas por OD. Tal fato indica que grande parte dos sólidos incorporados durante a etapa osmótica foi perdida durante o processo de reidratação e suas possíveis interações com a matriz do fruto não contribuíram para a retenção desses componentes. Os autores afirmam que, do ponto de vista tecnológico, a desidratação osmótica não é recomendada quando amostras secas precisam ser reidratadas.

4 CONCLUSÕES

A secagem por infravermelho mostrou-se efetiva na retirada de umidade e diminuição da atividade de água ($a_w < 0.6$) de fatias de banana. Todos os modelos empíricos utilizados na modelagem matemática da cinética de secagem de fatias de banana apresentaram bons ajustes, com valores de R^2 próximo a 1.0 e com reduzidos valores de E (%), SSE e RMSE. O modelo difusional de Fick foi satisfatório no ajuste dos dados experimentais, estimando a difusividade

efetiva da água transferida durante o processo de secagem por infravermelho. O coeficiente de difusividade foi maior para amostras submetidas a pré-tratamentos com ultrassom, especialmente US 20 e US 30.

O uso de energia ultrassônica como tratamento prévio a secagem convectiva de fatias de bananas resultou em redução do tempo de secagem de até 29%, apresentando maiores valores de difusividade efetiva de água, além de proporcionar menor encolhimento isotrópico, radial e longitudinal. Além disto, o tratamento resultou em cores intensas e melhor aspecto físico.

A desidratação osmótica, assistida ou não por ultrassom, proporcionou a produção de fatias de banana incorporadas de isomaltulose, porém não foi efetiva na redução de tempos e parâmetros de cinética de secagem, como o coeficiente de difusividade efetiva. Ademais, o tratamento osmótico resultou em um produto com maior encolhimento isotrópico, reduzidos parâmetros de coloração, porém com melhor habilidade de reidratação.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; KAVEH, M.; JAHANBAKHSI, A. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 43, n. 11, p. 1–17, Nov. 2019. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14178>. Acesso em: 19 mar. 2022.

ABRAHÃO, F. R.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1–20, Sept. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583597/>. Acesso em: 19 mar. 2022.

AGNIESZKA, C.; ANDRZEJ, L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 97, n. 2, p. 267–274, Mar. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877409005202>. Acesso em: 20 maio 2020.

AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 34, p. 29–43, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416000072>. Acesso em: 29 mar. 2022.

AKHIJAHANI, H. S.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M. H. Comparative quality assessment of different drying procedures for plum fruits (*Prunus domestica* L.). **Czech Journal of Food Sciences**, [Prague], v. 35, n. 5, p. 449–455, Sept. 2017. Disponível em: https://www.agriculturejournals.cz/web/cjfs.htm?type=article&id=440_2016-CJFS. Acesso em: 29 mar. 2022.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 59, n. 1, p. 99-104, Aug. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877402004259>. Acesso em: 29 mar. 2022.

AMAMI, E. *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 36, p. 286–300, May 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417716304473>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 18th ed. Arlington: AOAC, 2010.

ATARES, L.; GALLAGHER, M. J. S.; OLIVEIRA, F. A. R. Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 103, n. 4, p. 401–408, Apr. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877410005479>. Acesso em: 29 mar. 2022.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 97, n. 2, p. 194–198, Mar. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740900507X>. Acesso em: 29 mar. 2022.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Improvement of water transport and carotenoid retention during drying of papaya by applying ultrasonic osmotic pretreatment. **Food Engineering Reviews**, [New York], v. 7, n. 2, p. 185–192, Mar. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-015-9120-4>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BAKALIS, S.; KARATHANOS, V. T. Study of rehydration of osmotically pretreated dried fruit samples. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 23, n. 3, p. 533–549, Mar. 2005. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/drt-200054129>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BAPTESTINI, F. M. *et al.* Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, n. 5, p. 457–464, Sept./Oct. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/qHKqmY5RDbkC8Lkss5kk3yB/abstract/?lang=en>. Acesso em: 02 out. 2019.

- BIALIK, M. *et al.* The influence of osmotic dehydration conditions on drying kinetics and total carotenoid content of kiwiberry (*Actinidia Arguta*). **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 16, n. 1-2, p. 1–8, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2018-0328/html>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- BOZKIR, H. *et al.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 54, p. 135–141, June 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417718318388>. Acesso em: 27 mar. 2022.
- ÇAĞLAR, A.; TOĞRUL, I. T.; TOĞRUL, H. Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 87, n. 4, p. 292–300, Dec. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308509000054>. Acesso em: 27 mar. 2022.
- CHÁFER, M. *et al.* Rehydration kinetics of pear as affected by osmotic pretreatment and temperature. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 34, n. 2, p. 251–266, Apr. 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2008.00351.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- CHAGURI, L. *et al.* Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: Modeling, physical-chemical properties, color, and texture. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 10, n. 4, p. 615–629, Apr. 2017. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/en/publicacao/129590/green-banana-musa-cavendishii-osmotic-dehydration-by-non-c/>. Acesso em: 29 jul. 2020.
- CONTRERAS, C.; MARTÍN-ESPARZA, M. E.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Influence of drying method on the rehydration properties of apricot and apple. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 35, n. 2, p. 178–190, Feb. 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4530.2010.00579.x>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 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**, [Oxford], v. 41, p. 284–291, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416306725>. Acesso em: 22 abr. 2020.
- CORRÊA, J. L. G. *et al.* Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 96, n. 4, p. 498–504, Feb. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877409004373>. Acesso em: 22 abr. 2020.
- CORRÊA, J. L. G. *et al.* The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 8, p. 817–826, May 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.667469>. Acesso em: 22 abr. 2020.

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**, [Berkeley], v. 11, n. 4, p. 505–516, June 2015. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2015-0083/html>. Acesso em: 22 abr. 2020.

DA SILVA, G. D. *et al.* Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 74, p. 114–119, Dec. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002364381630442X>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DO CARMO, J. R. *et al.* Properties of isomaltulose (Palatinose®) – an emerging healthy carbohydrate: Effect of temperature and solute concentration. **Journal of Molecular Liquids**, [Amsterdam], v. 347, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732221030294>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DUJMIĆ, F. *et al.* Ultrasound-assisted infrared drying of pear slices: Textural issues. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 36, n. 3, p. 397–406, June 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.12006>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ERTEKIN, C.; HEYBELI, N. Thin-layer infrared drying of mint leaves. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 38, n. 4, p. 1480–1490, Aug. 2014. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12107>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FAN, K. *et al.* A novel method of osmotic-dehydrofreezing with ultrasound enhancement to improve water status and physicochemical properties of kiwifruit. **International Journal of Refrigeration**, [Oxford], v. 113, p. 49–57, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140700720300669>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 41, n. 4, p. 604–610, May 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807001867>. Acesso em: 22 set. 2020.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 12, p. 1509–1516, Dec. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802412256?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 22 set. 2020.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 82, n. 2, p. 261–267, Sept. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407001240>. Acesso em: 22 set. 2020.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of genipap (*Genipa americana* L.). **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 8, n. 3, p. 1–8, July 2012. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/1556-3758.2480/html>. Acesso em: 22 set. 2020.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analyses system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, 1039–1042, Nov./Dec. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/yjKLJXN9KysfmX6rvL93TSh>. Acesso em: 19 maio 2021.

GARCÍA-SEGOVIA, P.; ANDRÉS-BELLO, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 2, p. 480–488, Mar. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643810002884>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GERMER, S. P. M. *et al.* Influence of processing additives on the quality and stability of dried papaya obtained by osmotic dehydration and conventional air drying. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 32, n. 16, p. 1956–1969, Oct. 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2014.924963>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 76, Mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856422000182>. Acesso em: 19 maio 2021.

GU, C. *et al.* Effects of catalytic infrared drying in combination with hot air drying and freeze drying on the drying characteristics and product quality of chives. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 161, May 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822002985>. Acesso em: 29 mar. 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [Pavia], v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-\(I\)-Temperature-Effect-on-Hendorson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d](https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-(I)-Temperature-Effect-on-Hendorson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d). Acesso em: 29 mar. 2022.

HORUZ, E. *et al.* Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 230, p. 295–305, Sept. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28407914/>. Acesso em: 09 mar. 2022.

JEEVARATHINAM, G. *et al.* Infrared assisted hot air dryer for turmeric slices: Effect on drying rate and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 144, June 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643821004114>. Acesso em: 09 mar. 2022.

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**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–8, Dec. 2017. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.13250>. Acesso em: 20 fev. 2022.

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**, [Amsterdam], v. 82, p. 404–410, Sept. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643817302992>. Acesso em: 20 fev. 2022.

KAUR, K.; KUMAR, S.; ALAM, M. S. Air drying kinetics and quality characteristics of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) influenced by osmotic dehydration. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 16, n. 3, p. 214–222, Sept. 2014. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2831>. Acesso em: 29 mar. 2022.

KEK, S. P.; CHIN, N. L.; YUSOF, Y. A. Direct and indirect power ultrasound assisted pre-osmotic treatments in convective drying of guava slices. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 91, n. 4, p. 495–506, Oct. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096030851300045X>. Acesso em: 20 fev. 2022.

KHAWAS, P. *et al.* Drying characteristics and assessment of physicochemical and microstructural properties of dried culinary banana slices. **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 11, n. 5, p. 667–678, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2015-0094/html>. Acesso em: 29 mar. 2022.

KOCABIYIK, H.; TEZER, D. Drying of carrot slices using infrared radiation. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 44, n. 5, p. 953–959, May 2009. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2008.01767.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 82, p. 65–70, Aug. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270114001196>. Acesso em: 20 fev. 2022.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Structural properties of dehydrated products during rehydration. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 36, n. 5, p. 529–538, June 2001. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2621.2001.00483.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: Effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 55, n. 12, p. 5098–5105, Oct. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-018-3450-1>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, [Washington], v. 13, n. 5, p. 427-432, May 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50137a021>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Convective drying with ethanol pre-treatment of strawberry enriched with isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 14, p. 2046–2061, Sept. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02710-2>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 43, n. 9, p. 1–10, Sept. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13451>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 155, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821020715>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MAGALHÃES, M. L. *et al.* Drying intensification combining ultrasound pre-treatment and ultrasound-assisted air drying. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 215, p. 72–77, Dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417303254>. Acesso em: 20 fev. 2022.

MEDEIROS, R. A. B. de *et al.* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 67, p. 167–173, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815303406>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MELLO, R. E. *et al.* PEF as pretreatment to ultrasound-assisted convective drying: Influence on quality parameters of orange peel. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 72, Aug. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856421001545>. Acesso em: 20 fev. 2022.

MIANO, A. C.; IBARZ, A.; AUGUSTO, P. E. D. Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 29, p. 413–419, Mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417715300638>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MIERZWA, D.; KOWALSKI, S. J.; KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. **Food Technology and Biotechnology**, [Zagreb], v. 55, n. 2, p. 197–205, June 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5569343/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

NOSHAD, M. *et al.* Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 36, n. 5, p. 383–392, Oct. 2011. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4549.2011.00593.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.

NOWACKA, M. *et al.* Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 144, p. 18–25, Feb. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814613007358>. Acesso em: 29 mar. 2022.

NOWACKA, M. *et al.* Influence of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the main quality parameters of kiwifruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 41, p. 71–78, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416306166>. Acesso em: 29 mar. 2022.

NOWACKA, M. *et al.* Ultrasound assisted osmotic dehydration of organic cranberries (*Vaccinium oxycoccus*): Study on quality parameters evolution during storage. **Food Control**, [Oxford], v. 93, p. 40–47, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713518302305>. Acesso em: 19 mar. 2020.

ODEWOLE, M. M.; OLANIYAN, A. M. Effect of osmotic dehydration pretreatments on drying rate and post-drying quality attributes of red bell pepper (*capsicum annum*). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 18, n. 1, p. 226–236, Mar. 2016. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2922>. Acesso em: 29 mar. 2022.

OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with *Stevia*-based sweetener. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 90, n. 4, p. 713–718, Oct. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000107>. Acesso em: 29 mar. 2022.

OSAE, R. *et al.* Nonthermal pretreatments enhances drying kinetics and quality properties of dried ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 42, n. 5, Aug. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13117>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. 44 p. Master (Science in Mechanical Engineering) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

PAN, Z. *et al.* Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 41, n. 10, p. 1944–1951, Dec. 2008. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643808000418>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A.-J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 36–60, Jan. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0867-9>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PAWAR, S. B.; PRATAPE, V. M. Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: A review. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 40, n. 1, p. 1–15, Feb. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12308>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PEI, Y. *et al.* Effects of ultrasound pretreatment followed by far-infrared drying on physicochemical properties, antioxidant activity and aroma compounds of saffron (*Crocus sativus* L.). **Food Bioscience**, [Amsterdam], v. 42, Aug. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429221003114>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PEKKE, M. A. *et al.* Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [Beijing], v. 6, n. 3, p. 58–70, Sept. 2013. Disponível em: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/739>. Acesso em: 28 mar. 2021.

PRITHANI, R.; DASH, K. K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 64, Aug. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420303532>. Acesso em: 29 mar. 2021.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 80, p. 401–408, July 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643817301573>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PUANGSUWAN, K. *et al.* Hybrid infrared with hot air drying of Pisang-Awak banana: Kinetics and shrinkage quality. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 44, n. 10, p. 1–10, Oct. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13827>. Acesso em: 29 mar. 2022.

REN, Z. *et al.* Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale Roscoe*). **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 144, June 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643821003911>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RICCE, C. *et al.* Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 89, p. 701–708, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916304215>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RODRÍGUEZ, M. M.; RODRIGUEZ, A.; MASCHERONI, R. H. Color, texture, rehydration ability and phenolic compounds of plums partially osmodehydrated and finish-dried by hot air. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 39, n. 6, p. 2647–2662, Dec. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12515>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 61, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420302745>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 233, p. 17–27, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877418301390>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioprocess Processing**, [England], v. 119, p. 20–30, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308519305851>. Acesso em: 20 fev. 2022.

SADEGHI, E.; HAGHIGHI ASL, A.; MOVAGHARNEJAD, K. Optimization and quality evaluation of infrared-dried kiwifruit slices. **Food Science and Nutrition**, [Unites States], v. 8, n. 2, p. 720–734, Feb. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.1253>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SETTE, P. A. *et al.* Osmotic dehydrated raspberries: Changes in physical aspects and bioactive compounds. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 33, n. 6, p. 659–670, Feb. 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2014.971123>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SEYEDABADI, E.; KHOJASTEHPUR, M.; ABBASPOUR-FARD, M. H. Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian–Eulerian method. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 20, n. 1, p. S36–S49, May 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2017.1288134>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SHI, X. *et al.* Effects of radiation temperature on dehydration and moisture migration in banana slices during far-infrared radiation drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 44, n. 11, p. 1–11, Nov. 2020. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14901>. Acesso em: 19 ago. 2021.

SHYAM, S.; RAMADAS, A.; CHANG, S. K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 48, p. 173–178, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464618303372>. Acesso em: 02 out. 2020.

SIRIAMORNPNUN, S. *et al.* Effect of osmotic treatments and drying methods on bioactive compounds in papaya and tomato. **RSC Advances**, [England], v. 5, n. 24, p. 18579–18587, Jan. 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ra/c4ra16927a>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SOUZA, A. U. de *et al.* Hybrid microwave-hot air drying of the osmotically treated carrots. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 156, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364382102199X>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SWASDISEVI, T. *et al.* Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 92, n. 1, p. 100–106, May 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877408005293>. Acesso em: 02 out. 2020.

TABTIANG, S.; PRACHAYAWARAKON, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 1, p. 20–28, Jan. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.613554>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TAIWO, K. A.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Rehydration studies on pretreated and osmotically dehydrated apple slices. **Journal of Food Science**, [Malden], v. 67, n. 2, p. 842–847, Mar. 2002. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10687.x>. Acesso em: 02 out. 2020.

TAIWO, K. A.; BABALOLA, R. T. Studies on the drying kinetics and rehydration capacities of cardaba banana compared to plantain slices. **Open Agriculture**, [Poland], v. 3, n. 1, p. 57–71, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/opag-2018-0007/html>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TAKOUGNADI, E.; BOROZE, T.-E. T.; AZOUMA, O. Y. Effects of drying conditions on energy consumption and the nutritional and organoleptic quality of dried bananas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 268, p. 1–9, Mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419303917>. Acesso em: 29 mar. 2022.

THUWAPANICHAYANAN, R. *et al.* Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 6, p. 1502–1510, July 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643811000041>. Acesso em: 02 out. 2020.

TOŃRUL, H. Suitable drying model for infrared drying of carrot. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 77, n. 3, p. 610–619, Dec. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877405005261>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TUNCKAL, C.; DOYMAZ, İ. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. **Renewable Energy**, [Oxford], v. 150, p. 918–923, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120300458>. Acesso em: 29 mar. 2022.

VERMA, D.; KAUSHIK, N.; RAO, P. S. Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 7, p. 1281–1297, May 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-013-1124-6>. Acesso em: 06 out. 2020.

VON LOESECKE, H.W. **Bananas: Chemistry, physiology**. New York: Technology Inter Science, 1950.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying**. ASAE Meeting paper No. 78-6505, St. Joseph, MI, 1978. Disponível em: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002003579923786. Acesso em: 29 mar. 2022.

WANG, L. *et al.* Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. **Ultrasonics - Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 40, p. 619–628, Jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28946467/>. Acesso em: 02 out. 2020.

WIKTOR, A. *et al.* Drying kinetics and quality of dehydrated cranberries pretreated by traditional and innovative techniques. **Journal of Food Science**, [Malden], v. 84, n. 7, p. 1820–1828, July 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31206662/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

WU, X.-F.; ZHANG, M.; LI, Z. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris*. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 111, p. 790–798, Aug. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643819305390>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ZHANG, L. *et al.* Ultrasound-assisted rehydration of dried Sea Cucumber (*Stichopus japonicus*) – kinetics. **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 12, n. 8, p. 753–761, Sept. 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2016-0116/html>. Acesso em: 23 nov. 2021.

ZHAO, Y.-Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 3, p. 352–362, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2018.1456449?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 29 mar. 2022.

**ARTIGO 3 - USO DO MÉTODO *DUAL-STAGE SUGAR SUBSTITUTION* E DE
ULTRASSOM PARA A INCORPORAÇÃO DE ISOMALTULOSE EM FATIAS DE
BANANA**

Fernanda Rezende Abrahão^{1*}; Jefferson Luiz Gomes Corrêa¹; Arley de Brito Magalhães
Sousa²; Paula Giarolla Silveira¹; Renata Nepomuceno da Cunha².

¹Departamento de Ciência dos Alimentos DCA-UFLA, 32700-900, Lavras, MG, Brasil.

²Departamento de Engenharia Química, UNIPAM, 38702-054, Patos de Minas, MG, Brasil.

RESUMO

A técnica de substituição de açúcar em dois estágios (D3S) foi utilizada para incorporar isomaltulose em fatias de banana. No primeiro estágio da técnica, açúcares nativos da fruta foram parcialmente removidos e, no segundo, a isomaltulose, um carboidrato de baixo índice glicêmico, foi incorporado à banana. A energia ultrassônica foi aplicada em um ou ambos os estágios de forma a avaliar a sua influência no processo. Amostras submetidas às ondas ultrassônicas (40 kHz) nos dois estágios apresentaram maiores perdas de água ($10.007 \pm 0.554\%$) e maior ganho de sólidos ($4.809 \pm 0.195\%$). O processo de D3S resultou em maiores tempos de secagem. Os modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem apresentaram bom ajuste, com destaque para o de Midilli ($R^2 > 0.999$). A execução da técnica de D3S sem aplicação de ultrassom resultou em amostras secas com maior encolhimento longitudinal, maior encolhimento radial, maior coeficiente de encolhimento e maior diferenciação quanto à coloração em comparação com demais tratamentos. O uso de energia ultrassônica em ambos os estágios da técnica resulta em melhores características físico-químicas no produto final. Amostras submetidas ao processo de D3S apresentaram menor capacidade de reidratação.

Palavras-chave: Enriquecimento de alimentos. Desidratação osmótica. Cinética de secagem. Energia ultrassônica.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma crescente conscientização sobre a importância de uma alimentação saudável entre os consumidores tem se destacado (TYLEWICZ *et al.*, 2020). Os produtos com baixo teor de açúcar tornaram-se uma tendência de mercado, e sua produção basicamente compreende a utilização de matérias-primas de reduzido valor calórico (PEINADO *et al.*, 2013b; SAWALE *et al.*, 2017). Especialmente atrativa para dietas de atletas e diabéticos, a isomaltulose, conhecida como palatinose, é um carboidrato que apresenta valor calórico equivalente ao da sacarose (4 kcal/g), com grande aplicabilidade como ingrediente funcional no desenvolvimento de alimentos e bebidas com baixo índice glicêmico (DO CARMO *et al.*, 2022; MACEDO *et al.*, 2022; SAWALE *et al.*, 2017). É um carboidrato de digestão lenta, com potencial prebiótico, além de reconhecida propriedade não-cariogênica (SHYAM; RAMADAS; CHANG, 2018). O enriquecimento de alimentos com isomaltulose foi estudado com a impregnação por desidratação osmótica em frutas como limão (RUBIO-ARRAEZ *et al.*, 2015) e morango (MACEDO *et al.*, 2021, 2022; PEINADO *et al.*, 2013a).

Apesar de frutas e vegetais apresentarem quantidades reduzidas de calorias, seu uso combinado com diferentes matérias-primas e processos pode resultar na elevação do valor energético do produto final (ALASALVAR; SALVADÓ; ROS, 2020; CHANG; ALASALVAR; SHAHIDI, 2016). A redução do teor calórico de vegetais e frutas desidratados, como a banana, é possível, mantendo ainda seu sabor característico. Alguns trabalhos na literatura sugerem que o conteúdo de sólidos solúveis de frutas e vegetais pode ser minimizado a partir da imersão do alimento em água destilada submetendo-os ao ultrassom (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2011; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). A energia ultrassônica, ao penetrar na amostra, acelera a transferência de massa do interior para a superfície por meio de ondas mecânicas e a formação de microcanais, auxiliando na remoção de um expressivo percentual de sólidos em um reduzido período de tempo (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020).

Diante disso, Garcia-Noguera *et al.* (2010) propuseram uma nova técnica, denominada substituição de açúcar em dois estágios (D3S), sendo aplicada previamente a processos de secagem de frutas. No estágio inicial do D3S, pedaços da fruta são imersos em água, para a remoção dos açúcares de alto valor calórico, enquanto no estágio final objetiva-se a introdução de um edulcorante, restaurando a doçura original do alimento (MEDEIROS *et al.*, 2016; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). A técnica já foi reproduzida em maçãs

(OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012), manga (DE MEDEIROS *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2016) e morangos (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010), em que foi relatado que a utilização de ultrassom pode potencializar a transferência de massa (remoção de sólidos no primeiro estágio e/ou incorporação de solutos no segundo estágio).

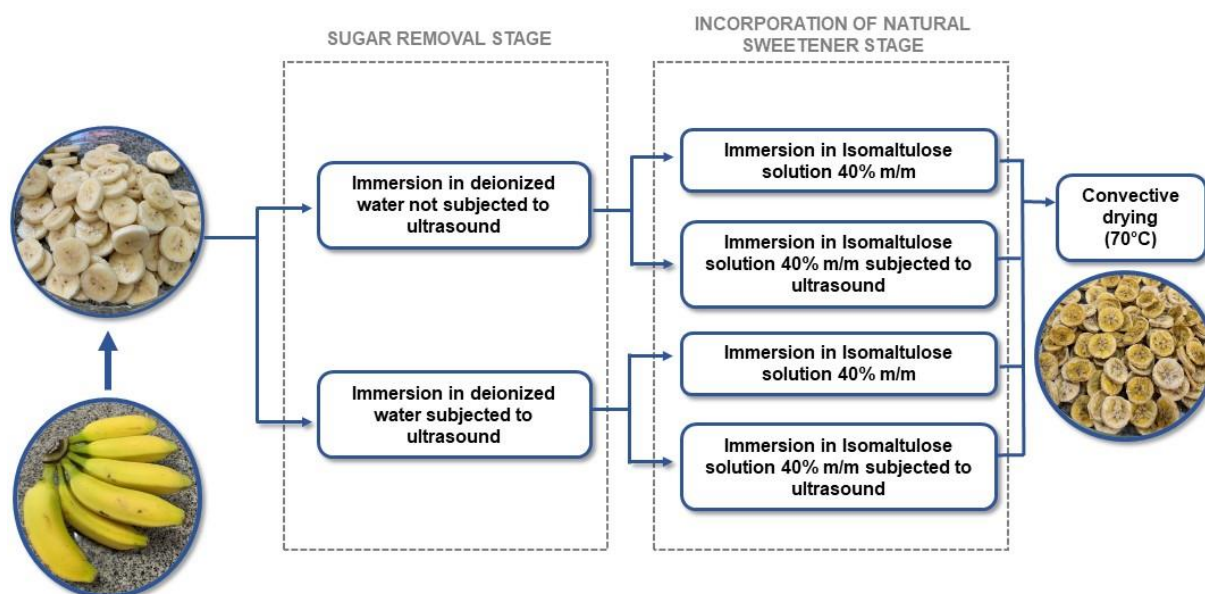
O processo de D3S requer um processamento adicional para a garantia da estabilidade dos produtos obtidos, como a secagem. A diminuição do teor de umidade promovida pela secagem resulta em uma redução da atividade de água, minimizando o crescimento microbiano e reações enzimáticas e deteriorantes (MACEDO *et al.*, 2020). Apesar das vantagens da secagem, o uso de temperaturas elevadas por longos períodos de tempo podem levar à degradação de nutrientes e alteração de propriedades sensoriais e físico-químicas finais, como cor e volume (CORRÊA. *et al.*, 2012).

O presente estudo teve como objetivo a avaliação do uso da técnica de D3S para a incorporação de isomaltulose e como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de banana. O efeito da energia ultrassônica durante ambos os estágios do processo de D3S em fatias de banana também foi tratado. A cinética de secagem foi acompanhada com avaliação do tempo de secagem e o ajuste com a modelagem matemática proposta pela literatura. A qualidade da fruta seca em termos de atividade de água, cor e sua capacidade de reidratação também foi avaliada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

No presente estudo, a técnica de D3S foi aplicada para a incorporação de isomaltulose em fatias de banana. O esquema com o *design* experimental está apresentado na Figura 1 e será explicado detalhadamente nas seções posteriores. No primeiro estágio, açúcares nativos da fruta (sacarose, frutose e glicose) foram parcialmente removidos, e no segundo estágio um carboidrato de baixo índice glicêmico (isomaltulose) foi incorporado na fruta visando a melhoria de sua aceitabilidade e valor nutritivo.

Figura 1 - Fluxograma de etapas da técnica de D3S aplicada em fatias de banana.



Fonte: Da autora (2022).

2.1 Preparação das amostras

Bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) foram obtidas do mercado local da cidade de Patos de Minas, MG, Brasil. A seleção das frutas foi realizada com base na sua integridade e no grau de maturação através da coloração da casca pela escala de Von Loesecke (1950). Foram selecionadas bananas nos estágios 3 e 4 (aspecto verde/amareladas). As frutas foram higienizadas, descascadas manualmente e cortadas transversalmente em fatias com espessura de 0.5 cm e diâmetro de 2.5 cm com um cortador de inox específico. Buscando reduzir as variações, as amostras de banana de cada repetição pertenciam ao mesmo cacho.

As frutas foram caracterizadas quanto ao seu teor de sólidos solúveis, com o uso de um refratômetro, teor de umidade em estufa a vácuo a 70 °C (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC, 2010), atividade de água (Aqualab, 3-TE model, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA), pH e acidez titulável. Para a determinação da acidez titulável e do pH, 2.0 g de amostra foram triturados e homogeneizados com 50 mL de água deionizada. A leitura do pH foi realizada por um pHmêtro de bancada digital (Modelo DM-22, Digimed). Todas as análises foram realizadas em triplicatas. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização da banana Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) fresca.

| Propriedade * | Média ± Desvio Padrão |
|---|------------------------------|
| Umidade (kg H ₂ O/kg b.s.) | 2.633 ± 0.136 |
| Atividade de água | 0.934 ± 0.009 |
| Acidez titulável (g ácido málico/100 g) | 0.543 ± 0.112 |
| pH | 4.82 ± 0.08 |
| Sólidos Solúveis (°Brix) | 22.55 ± 0.98 |

* Média de três repetições ± desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

2.2 Processo de D3S

O processo de D3S estudado foi adaptado a partir dos estudos de Garcia-Noguera *et al.* (2010) e Medeiros *et al.* (2016). Assim, 4 tratamentos foram avaliados, diferenciando-se quanto à aplicação ou não de energia ultrassônica nos estágios (TABELA 2).

Tabela 2 - Delineamento experimental aplicado no estudo de *Dual-Stage Sugar Substitution* (D3S).

| Código | Frequência Ultrassom no primeiro estágio (kHz) | Frequência Ultrassom no segundo estágio (kHz) | Concentração da Solução de Isomaltulose (m/m) | Tempo de imersão no primeiro estágio (min) | Tempo de imersão no segundo estágio (min) |
|---------------|---|--|--|---|--|
| D3S 1 | 0 | 0 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 2 | 0 | 40 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 3 | 40 | 0 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 4 | 40 | 40 | 40% | 30 | 30 |

Fonte: Da autora (2022).

O primeiro estágio do D3S baseou-se na imersão de 100 g de fatias de banana em água deionizada por 30 minutos com e sem a aplicação de ultrassom. A razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra foi de 4:1 (m/m). Os pré-tratamentos que não utilizaram energia ultrassônica foram realizados em temperatura ambiente (25 °C). Os pré-tratamentos assistidos por energia ultrassônica foram realizados em banho ultrassônico (Modelo 03502, Quimis, São Paulo, Brasil). A frequência de operação do banho ultrassônico foi de 40 kHz e a potência volumétrica do ultrassom foi de 7.907 ± 0.658 W/L, determinada pelo método calorimétrico (LA FUENTE; TADINI, 2018). Recipientes contendo as unidades experimentais atribuídas aos

pré-tratamentos com ultrassom foram colocados dentro do reservatório do banho, contendo um meio líquido de água deionizada. A temperatura de execução foi mantida em 25.0 ± 3.0 °C.

Após o período de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres, depositadas em papel absorvente para remoção do excesso de água, pesadas e, então, submetidas ao segundo estágio.

O segundo estágio da técnica de D3S, que consiste na incorporação de isomaltulose, foi realizado durante 30 minutos, com solução concentrada de isomaltulose (40% m/m) com e sem a aplicação de energia ultrassônica. A mesma razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra (4:1 (m/m)) usada no primeiro estágio foi aplicada nesse estágio.

Isomaltulose (Beneo, Mannheim, Alemanha) foi utilizada como o carboidrato incorporado nas fatias de banana. A solução foi preparada a partir da diluição da quantidade requerida de sólidos em água deionizada, seguida de agitação por 10 minutos. Os experimentos em que se utilizou energia ultrassônica na segunda etapa foram realizados no mesmo equipamento ultrassônico e frequência do primeiro estágio. As amostras foram acondicionadas em béqueres contendo a solução concentrada de isomaltulose e submetidas a ondas ultrassônicas por 30 minutos. As amostras foram retiradas da solução, drenadas para a retirada do excesso de solução, e pesadas.

A massa e o teor de umidade das amostras foram utilizados para calcular as variáveis respostas do experimento: perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG), conforme as equações 1 e 2, respectivamente (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

$$WL(\%) = \frac{w_i \cdot x_i - w_f \cdot x_f}{w_i} \cdot 100 \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{w_f \cdot x_{sf} - w_i \cdot x_{si}}{w_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que w_i é a massa inicial da amostra (kg), x_i é o teor de umidade inicial da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), w_f é a massa final da amostra, x_f é o teor de umidade final da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), x_{sf} é o teor de sólidos totais final da amostra (kg sólido/kg) e x_{si} é o teor de sólidos totais inicial da amostra (kg/kg bs). Todos os experimentos foram realizados em triplicata e os valores apresentados são baseados nas médias encontradas.

2.3 Secagem convectiva

A secagem convectiva das amostras controle e tratadas pelo método de D3S foi executada em um secador de bandejas (Modelo PEG60, Pardal, Petrópolis, Brasil) com circulação de ar forçada com velocidade de 1.1 ± 0.3 m/s, na temperatura de 70 °C. Após a realização dos pré-tratamentos, as amostras foram dispostas em bandejas perfuradas. Para manter a condição de ar constante, apenas uma bandeja foi usada com uma única camada de amostra em cada secagem. As bandejas contendo as amostras foram pesadas em intervalos de 5 minutos durante a primeira hora, 10 minutos até a quarta hora de secagem e depois em intervalos de 20 minutos até o equilíbrio dinâmico (peso constante).

O teor de umidade das amostras durante o processo de secagem foi determinado gravimetricamente a partir do teor de umidade inicial da amostra (antes do processo de secagem). O peso da amostra foi medido em balança semianalítica (Modelo DG-15, Digimed, Brasil). A cinética de secagem foi estudada observando-se as curvas de secagem para a temperatura considerada. Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata.

2.3.1 Modelagem matemática

Os dados experimentais obtidos nos experimentos de secagem foram ajustados utilizando seis diferentes equações de secagem em camada delgada (TABELA 3). A razão de umidade (MR) das amostras durante os experimentos foi calculada usando a Eq. 3:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (3)$$

em que X_t , X_o e X_{eq} representam o teor de umidade durante a secagem, teor de umidade inicial e teor de umidade de equilíbrio (kg H₂O/kg d.b.), respectivamente (JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 3 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada.

| Modelo | Equação | Referência |
|-------------------|--|---|
| Henderson & Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | Henderson e Pabis (1961) |
| Logarítmico | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ | Akpinar, Bicer e Yildiz (2003) |
| Midilli | $MR = -\exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ | Abbaspour-Gilandeh, Kaveh e Jahanbakhshi (2019) |
| Newton | $MR = \exp(-k \cdot t)$ | Lewis (1921) |
| Page | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$ | Page (1949) |
| Wang & Singh | $MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$ | Wang e Singh (1978) |

Em que: MR é a razão de umidade (adimensional), t é o tempo de secagem (min), a, b, n e k são constantes empíricas e coeficientes nas equações de secagem.

Fonte: Da autora (2022).

2.3.2 Difusividade efetiva

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de difusão unidirecional para estimar a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A segunda lei de Fick para a difusão unidirecional foi aplicada (Eq. 4).

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot (D_{eff} \cdot \frac{\partial X_t}{\partial z}) \quad (4)$$

Em que X é a umidade (kg H₂O/kg d.b.) no tempo t, D_{eff} é a difusividade efetiva (m² s⁻¹), z é uma coordenada geral (m) e t é a denotação de tempo (s). Considerando o formato e dimensão das fatias de banana, é possível assumir que não haverá difusão nas direções angular e radial e, assim, a amostra pode ser considerada como uma placa de espessura 2L. Para tal geometria, o valor de D_{eff} pode ser determinado conforme a Eq. 5.

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} 1/(2i + 1)^2 \cdot \exp(-(2i + 1)^2 \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}) \right) \quad (5)$$

Em que MR é o conteúdo de água adimensional e L é o comprimento característico (metade da espessura) (m). A condição inicial é uma quantidade inicial uniforme de água ou sólido, X(z, 0) = X₀. As condições de contorno são a simetria de concentração, $\frac{\partial X_t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$, e

o conteúdo de equilíbrio na superfície $X_{(L,t)} = X_{eq}$ (CORRÊA *et al.*, 2012; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

2.4 Encolhimento volumétrico

O volume (V) das amostras foi calculado a partir da espessura (l) e da média de três medidas do diâmetro (d) nos respectivos eixos coordenados com o auxílio de um paquímetro digital calibrado (MTX – 510289, Matrix, Brasil). Três amostras foram avaliadas para cada tratamento durante a secagem. A contração volumétrica foi avaliada nas direções radial (SR) e longitudinal (SL), Eq. 6 e Eq. 7, respectivamente, considerando o início e o final do processo de secagem (CORRÊA *et al.*, 2012):

$$SR = \frac{d_0 - d}{d_0} \quad (6)$$

$$SL = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (7)$$

O coeficiente de encolhimento (SC) também foi determinado, conforme a Eq. 8 (CORRÊA *et al.*, 2012). Tal coeficiente indica o quanto a amostra teve seu volume reduzido ao longo da secagem. Para a determinação do volume, as amostras foram consideradas como um disco. O diâmetro e a espessura das amostras foram avaliados a partir de um paquímetro digital calibrado.

$$SC = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (8)$$

O encolhimento isotrópico (SI) foi obtido a partir da relação entre o encolhimento radial e o encolhimento longitudinal, conforme apresentado na Eq. 9.

$$SI = \frac{SR}{SL} \quad (9)$$

2.5 Caracterização físico-química

2.5.1 Teor de umidade e atividade de água (a_w)

O teor de umidade das amostras secas foi determinado gravimetricamente em estufa a vácuo a 70 °C até peso constante (AOAC, 2010). A determinação da atividade de água foi realizada em um higrômetro (Aqualab, modelo 3-TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA). As análises foram realizadas em triplicata.

2.5.2 Acidez titulável e pH

Para a determinação da acidez titulável e leitura do pH, 2.0 g de amostra foram triturados e homogeneizados com 50 mL de água deionizada. Na determinação da acidez titulável, três gotas de fenolftaleína foram adicionadas e as amostras foram tituladas com solução de hidróxido de sódio 0.1N. Os resultados foram expressos em percentagem (g de ácido málico em 100 g de amostra) (MACEDO *et al.*, 2020). A leitura do pH foi realizada por um pHmêtro de bancada digital (Modelo DM-22, Digimed). Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

2.5.3 Análise colorimétrica

A coloração da superfície das amostras secas foi analisada a partir de um colorímetro digital (Minolta, Modelo CR-400, Osaka, Japão). As medidas foram realizadas em diferentes posições de cada amostra. O sistema de coordenadas CIELAB (L^* , a^* e b^*) foi mensurado com iluminante D65, em que L^* expressa a claridade (100 para branco a 0 para preto), a^* indica vermelho quando positivo e verde quando negativo, b^* indica amarelo quando positivo e azul quando negativo (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Os valores do Chroma (C^*) e tonalidade (H°) foram calculados de acordo com a Eq. 10 e a Eq.11, respectivamente.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (10)$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (11)$$

2.6 Capacidade de reidratação

A avaliação da capacidade de absorção de água das amostras secas foi determinada por meio da capacidade de reidratação (RC). As amostras secas (aproximadamente 1 g) foram

imersas em 150 mL de água deionizada a 25 ± 2 °C. Em intervalos de tempo pré-determinados, as amostras eram removidas da água, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água e pesadas. A variação da massa das amostras foi utilizada para a avaliação do processo de reidratação, conforme a Eq. 12 (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Todos os testes foram realizados em quadruplicata e os valores médios foram utilizados para os cálculos.

$$RC = \frac{\text{massa das amostras reidratadas}}{\text{massa das amostras secas}} \quad (12)$$

2.7 Análise estatística

Os parâmetros e constantes das equações empíricas foram estimados, correlacionando-se os modelos matemáticos aos dados experimentais, com o uso da regressão não linear pelo método Quase-Newton ao nível de 5% de significância, pelo *software* Statistica7.0® (StatSoft Inc., Tulsa, OK). A avaliação dos modelos aplicados foi baseada no maior coeficiente de determinação (R^2) e no menor valor do desvio médio relativo (E%) (Eq. 13), em que m_i é o valor experimental, m_p é o valor previsto e N é o tamanho da amostra. Outros parâmetros estatísticos como a soma do erro quadrático (SSE) (Eq. 14) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (Eq. 15) também foram utilizados para avaliar e comparar a qualidade do ajuste.

$$E (\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad (13)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \quad (14)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (m_i - m_p)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Para a avaliação dos resultados das análises qualitativas, aplicou-se ANOVA, seguida do teste de Tukey, ambos considerando um nível de significância de 5%. Assim, como demais análises estatísticas, foi utilizado o *software* Statistica 7.0® (Statsoft, Tulsa, USA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos pré-tratamentos

Os efeitos das etapas de D3S na perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e umidade final (X) das amostras estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação das etapas da técnica de D3S.

| Tratamento | WL (%) | SG (%) | X (kg H ₂ O/kg d.b.) |
|------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| D3S 1 | 5.491 ± 0.557 ^b | 1.536 ± 0.273 ^b | 3.232 ± 0.106 ^a |
| D3S 2 | 6.622 ± 0.663 ^b | 4.262 ± 0.244 ^a | 2.758 ± 0.148 ^b |
| D3S 3 | 5.701 ± 0.928 ^b | 1.803 ± 0.270 ^b | 3.457 ± 0.058 ^a |
| D3S 4 | 10.007 ± 0.554 ^a | 4.809 ± 0.195 ^a | 2.938 ± 0.073 ^b |

Em que US representa ultrassom, SG representa ganho de sólidos e WL representa perda de água. Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Na etapa de remoção de açúcares (primeiro estágio), as fatias de banana perderam sólidos e ganharam aproximadamente 9.0% de água. Os resultados obtidos de SG foram $-2.952 \pm 0.341\%$ e $-5.861 \pm 0.111\%$ para o primeiro estágio sem e com ultrassom, respectivamente. Os açúcares perdidos durante o primeiro estágio são compostos principalmente de glicose e frutose e, para fins práticos, considera-se tal perda igual à perda de sólidos solúveis (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). Porém, amostras submetidas à energia ultrassônica na primeira etapa apresentaram uma maior perda de sólidos (-5.861%), decorrente da formação de microcanais no tecido celular, que induz a uma maior transferência de massa.

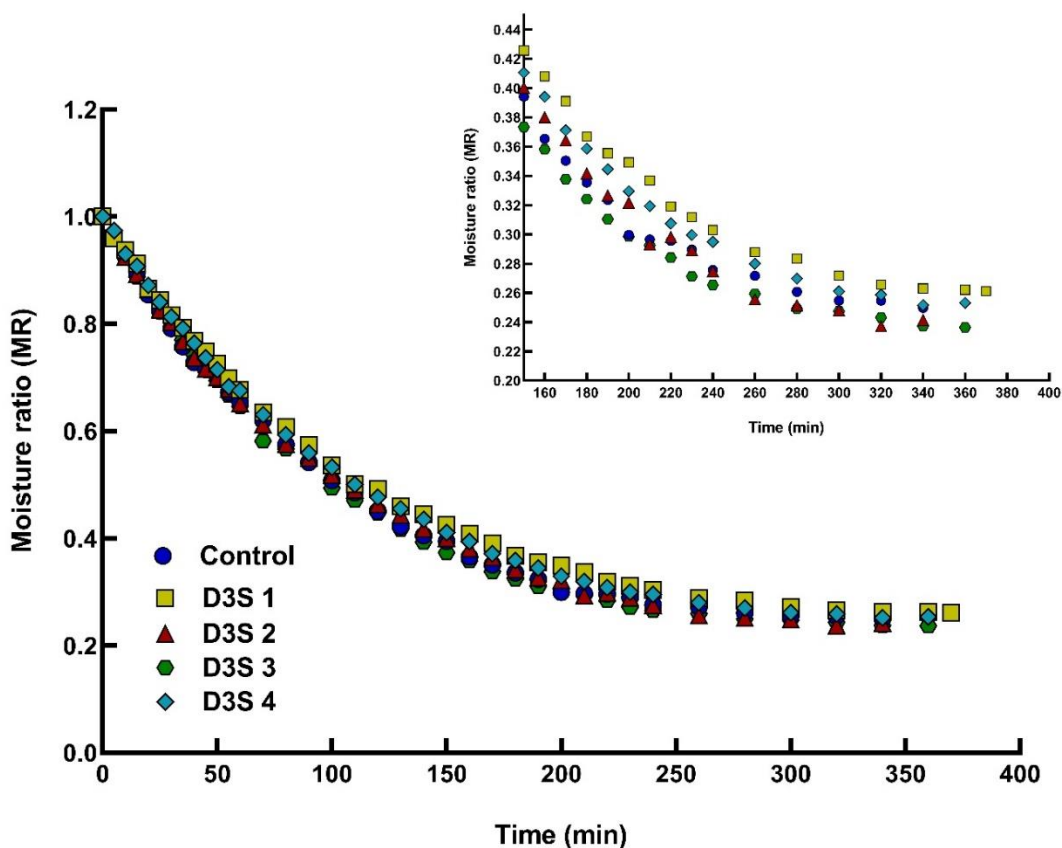
O teor de ganho de sólidos no processo de D3S 4 (4.809%) que consiste em duas etapas assistidas por ultrassom (tanto no estágio de remoção de açúcares quanto na etapa de incorporação de isomaltulose) foi maior do que demais tratamentos. Tal comportamento pode ser explicado pela influência das ondas ultrassônicas na parede celular, a partir da formação de microcanais e do processo de cavitação, que resultam em maiores taxas de transferência de massa entre a fruta e a solução concentrada de isomaltulose durante o estágio de incorporação (DE MEDEIROS *et al.*, 2019; GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010). Além disso, como a parede celular já foi desestabilizada pelas ondas ultrassônicas no primeiro estágio do D3S, a incorporação de solutos será facilitada na etapa posterior, devido ao gradiente de concentração existente entre a fruta e a solução de isomaltulose. Comportamento semelhante foi relatado em estudos de D3S com manga (DE MEDEIROS *et al.*, 2019) e maçã (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012), nos quais foi observado que a aplicação do ultrassom, em ambos os

estágios, resultou em ganho de sólidos relativamente maior do que amostras sem tratamento ultrassônico. Garcia-Noguera *et al.* (2010) observaram em seu estudo que a incorporação de estévia em morangos foi maior quando o segundo estágio foi realizado sem ultrassom. Os autores relataram que a energia ultrassônica induz a uma extração de sólidos solúveis das amostras, reduzindo a incorporação de outros açúcares.

3.2 Cinética de secagem e modelagem matemática

De maneira a comparar a influência das diferentes condições de D3S na cinética de secagem das fatias de banana, o teor de umidade adimensional (até o ponto de equilíbrio dinâmico) e sua variação durante o processo de secagem são representados na Figura 2. O tempo médio de secagem de cada tratamento e a umidade final estão apresentados na Tabela 5.

Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem de fatias de banana submetidas a diferentes condições de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 5 - Tempo médio de secagem e teor de umidade (X) das fatias de banana submetidas a diferentes condições de D3S e posterior secagem convectiva.

| Tratamento | Tempo (min) | X (kg H ₂ O/kg d.b.) |
|------------|------------------------------|---------------------------------|
| Controle | 330.00 ± 0.01 ^b | 0.200 ± 0.011 ^a |
| D3S 1 | 370.00 ± 10.00 ^a | 0.184 ± 0.023 ^a |
| D3S 2 | 336.67 ± 5.77 ^{ab} | 0.179 ± 0.040 ^a |
| D3S 3 | 360.00 ± 20.00 ^{ab} | 0.196 ± 0.040 ^a |
| D3S 4 | 350.00 ± 10.00 ^{ab} | 0.253 ± 0.079 ^a |

Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Como esperado, o teor de umidade das amostras reduziu com o tempo de secagem, apresentando um decaimento exponencial (FIGURA 2). No estágio inicial, o processo é controlado principalmente pelo mecanismo de difusão, com a razão de umidade caindo rapidamente, até que, gradualmente, o teor de umidade de equilíbrio seja atingido (BOZKIR *et al.*, 2019; CORRÊA *et al.*, 2012; TAKOUGNADI; BOROZE; AZOUMA, 2020). De maneira geral, as amostras submetidas a diferentes condições da técnica de D3S apresentaram curvas de secagem similares à amostra controle, independentemente da aplicação de ultrassom. O tempo médio de secagem das amostras tratadas com a técnica de D3S variou entre 336 a 370 minutos, valores relativamente maiores do que o tempo médio obtido pela amostra controle. A umidade final média das amostras mostrou-se estatisticamente similar ($p < 0.05$) entre os tratamentos e a amostra controle.

Como pode ser observado, o uso da técnica de D3S como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de banana não resultou em tempos médios de secagem reduzidos quando comparado com as amostras controle. A incorporação de solutos pela estrutura celular da fruta após o segundo estágio pode ter dificultado o fluxo de água, reduzindo a difusividade e aumentando, conseqüentemente, o tempo de secagem (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017). A incorporação de solutos por processo osmótico promoveu resultados semelhantes na secagem de pimentão (ODEWOLE; OLANIYAN, 2016), cenoura (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017), banana (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012), morango (MACEDO *et al.*, 2022) e mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015).

Embora estatisticamente semelhantes ($p < 0.05$), amostras que foram submetidas a energia ultrassônica em pelo menos uma etapa apresentaram tempos de secagem médios menores do que amostras que não foram submetidas às ondas ultrassônicas (D3S 1). A energia ultrassônica, ao penetrar na amostra, afeta a microestrutura celular, promovendo desintegração, facilitando a difusão da água durante o processo de secagem (MEDEIROS *et al.*, 2016; OSAE *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2018).

Os parâmetros de ajustes, constantes e critérios de comparação das equações matemáticas utilizadas no estudo estão apresentados na Tabela 6. Os modelos matemáticos aplicados aos dados experimentais apresentaram bom ajuste, obtendo valores elevados de R^2 , variando de 0.970 a 0.999. A escolha da equação matemática com melhor ajuste foi baseada em maiores valores de R^2 e menores valores de SSE, E (%) e RMSE. Desse modo, é possível observar que dentre as equações para secagem em camada delgada testadas, as equações Logarítmica e de Midilli melhor representaram o processo de secagem de fatias de banana, com valores altos de R^2 (0.999) e baixos valores de SSE, E (%) e RMSE (< 0.049) para todos os tratamentos. Resultado semelhante foi observado em estudos com banana maduras (MACEDO *et al.*, 2020) e bananas verdes secas (LA FUENTE; TADINI, 2018), nos quais a aplicação do modelo de Midilli melhor representou a cinética de secagem da fruta em todas as temperaturas testadas.

Tabela 6 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R^2 | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|-------|-------|--------------------|-------|
| Controle | | | | | |
| Page | $k = 0.017; n = 0.788$ | 0.995 | 0.887 | 0.001 | 0.023 |
| Newton | $k = 0.006$ | 0.981 | 2.796 | 0.002 | 0.046 |
| Logarítmico | $a = 0.792; b = 0.010; k = 0.208$ | 0.999 | 0.028 | 1×10^{-4} | 0.008 |
| Wang & Singh | $a = -0.006; b = 11 \times 10^{-6}$ | 0.992 | 0.662 | 0.001 | 0.029 |
| Henderson & Pabis | $a = 0.938; k = 0.005$ | 0.987 | 2.345 | 0.001 | 0.038 |
| Midilli | $k = 0.009; n = 0.972; b = 5 \times 10^{-4}$ | 0.999 | 0.045 | 4×10^{-5} | 0.006 |

Tabela 6 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Conclusão).

| Modelo | Parâmetros | R ² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|----------------|-------|----------------------|-------|
| D3S 1 | | | | | |
| Page | k = 0.016; n = 0.781 | 0.994 | 0.969 | 0.001 | 0.024 |
| Newton | k = 0.005 | 0.979 | 2.759 | 0.002 | 0.048 |
| Logarítmico | a = 0.782; b = 0.009; k = 0.222 | 0.999 | 0.012 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.006 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 9 × 10 ⁻⁶ | 0.992 | 0.653 | 0.001 | 0.028 |
| Henderson & Pabis | a = 0.939; k = 0.005 | 0.985 | 2.393 | 0.002 | 0.040 |
| Midilli | k = 0.008; n = 0.979; b = 5×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.009 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |
| D3S 2 | | | | | |
| Page | k = 0.016; n = 0.802 | 0.997 | 0.834 | 3 x 10 ⁻⁴ | 0.018 |
| Newton | k = 0.006 | 0.985 | 2.638 | 0.002 | 0.041 |
| Logarítmico | a = 0.802; b = 0.009; k = 0.194 | 0.999 | 0.033 | 4 x 10 ⁻⁵ | 0.006 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 11 × 10 ⁻⁶ | 0.992 | 0.747 | 0.001 | 0.030 |
| Henderson & Pabis | a = 0.942; k = 0.005 | 0.990 | 2.237 | 0.001 | 0.033 |
| Midilli | k = 0.009; n = 0.948; b = 4×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.017 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| D3S 3 | | | | | |
| Page | k = 0.017; n = 0.790 | 0.994 | 1.275 | 0.001 | 0.028 |
| Newton | k = 0.006 | 0.979 | 3.821 | 0.002 | 0.049 |
| Logarítmico | a = 0.807; b = 0.010; k = 0.203 | 0.999 | 0.017 | 1 x 10 ⁻⁴ | 0.007 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 11 × 10 ⁻⁶ | 0.991 | 0.585 | 0.001 | 0.032 |
| Henderson & Pabis | a = 0.942; k = 0.006 | 0.985 | 3.143 | 0.002 | 0.042 |
| Midilli | k = 0.008; n = 0.997; b = 5×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.011 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| D3S 4 | | | | | |
| Page | k = 0.015; n = 0.800 | 0.995 | 0.979 | 0.001 | 0.023 |
| Newton | k = 0.006 | 0.983 | 2.663 | 0.002 | 0.044 |
| Logarítmico | a = 0.796; b = 0.009; k = 0.210 | 0.999 | 0.007 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.005 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 10 × 10 ⁻⁶ | 0.994 | 0.574 | 0.001 | 0.027 |
| Henderson & Pabis | a = 0.946; k = 0.005 | 0.988 | 2.330 | 0.001 | 0.037 |
| Midilli | k = 0.008; n = 0.987; b = 5×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.013 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.003 |

Onde: a, b, n são os parâmetros e k a constante dos modelos matemáticos.

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 7 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras.

| Tratamento | $D_{\text{eff}} \times 10^{11} \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ | R^2 |
|------------|---|-------|
| Controle | 1.80 ± 0.07 | 0.985 |
| D3S 1 | 1.66 ± 0.02 | 0.985 |
| D3S 2 | 1.76 ± 0.10 | 0.986 |
| D3S 3 | 1.75 ± 0.17 | 0.983 |
| D3S 4 | 1.88 ± 0.21 | 0.985 |

Em que: D_{eff} é coeficiente de difusividade de Fick; R^2 é o coeficiente de correlação. Média de três repetições \pm desvio padrão.

Fonte: Da autora (2022).

Entendendo a importância do processo de difusão na cinética de secagem das amostras, o coeficiente de difusividade de água de Fick foi calculado e está apresentado na Tabela 7. É possível observar que amostras que foram submetidas à energia ultrassônica em ambos os estágios do D3S (D3S 4) apresentaram maior valor de D_{eff} quando comparadas ao tratamento controle e demais tratamentos, possivelmente devido à desestabilização celular. Resultado semelhante foi observado em estudo com bananas verdes, no qual a aplicação da energia ultrassônica resultou em um aumento de 4.8% na difusividade efetiva de umidade (LA FUENTE; TADINI, 2018). Em estudo com mamão, o aumento na difusividade pelo uso de US foi associado à formação de microcanais, que facilita a movimentação das moléculas de água para a superfície da fruta (AZOUBEL *et al.*, 2015). Quando associado ao etanol como pré-tratamento, a aplicação de US promoveu maiores valores de difusividade em bananas, apresentando uma tendência crescente com o aumento do tempo de tratamento (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022).

Além disso, o tratamento controle resultou em valor de D_{eff} relativamente maior ($1.80 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) que o encontrado em amostras submetidas à técnica de D3S. Isso pode ser explicado pelas mudanças físicas e químicas nas fatias de banana, principalmente durante o estágio de incorporação de isomaltulose, que resultam em diferentes taxas de secagem e consequente reduzido valor de difusividade. A etapa de incorporação promove uma saturação da superfície das amostras com moléculas de isomaltulose, criando uma resistência extra para os processos de transferência de calor e massa. Macedo *et al.* (2021) também observaram que amostras que tiveram incorporação de sólidos apresentaram uma tendência de demanda por maior tempo de secagem. Os autores correlacionaram isso com a maior incorporação de soluto durante processos osmóticos, aumentando a quantidade e a força das ligações de água com o alimento, dificultando a perda de umidade.

3.3 Encolhimento volumétrico

O encolhimento é uma alteração física inerente ao processo de secagem, representando um importante parâmetro de qualidade da fruta seca (MACEDO *et al.*, 2022). A perda de água juntamente com o ar quente da secagem causa estresse ao tecido celular, alterando sua microestrutura e promovendo encolhimento (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017). Os parâmetros de encolhimentos das bananas secas estão apresentados na Tabela 8. Para melhor comparação, os valores apresentados foram calculados a partir das medidas de diâmetro e espessura das amostras no final da secagem convectiva.

Tabela 8 - Parâmetros de encolhimento de fatias de bananas secas.

| Tratamento | SR | SL | SC | SI |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Controle | 0.131 ± 0.039 | 0.374 ± 0.055 | 0.525 ± 0.084 | 0.346 ± 0.052 |
| D3S 1 | 0.166 ± 0.021 | 0.401 ± 0.066 | 0.582 ± 0.065 | 0.417 ± 0.017 |
| D3S 2 | 0.133 ± 0.037 | 0.335 ± 0.087 | 0.496 ± 0.111 | 0.394 ± 0.010 |
| D3S 3 | 0.091 ± 0.009 | 0.279 ± 0.046 | 0.403 ± 0.047 | 0.329 ± 0.038 |
| D3S 4 | 0.147 ± 0.074 | 0.358 ± 0.088 | 0.526 ± 0.140 | 0.401 ± 0.173 |

Média de três repetições ± desvio padrão. Onde SR representa encolhimento radial, SL o encolhimento longitudinal, SC o coeficiente de encolhimento e SI o encolhimento isotrópico.

Fonte: Da autora (2022).

Como demonstrado na Tabela 8, o encolhimento longitudinal foi maior que o encolhimento radial. Comportamento semelhante foi observado em estudo com fatias de bananas maduras e verdes (CORRÊA *et al.*, 2012; SEYEDABADI; KHOJASTEHPUR; ABBASPOUR-FARD, 2017). Segundo os autores, tal comportamento é esperado, pois a transferência de massa ocorre na direção longitudinal, devido à posição do fluxo de ar quente. Além disto, é importante destacar que as fatias de banana que não foram submetidas a energia ultrassônica em nenhum estágio (D3S 1) obtiveram maiores valores de encolhimento longitudinal, encolhimento radial e coeficiente de encolhimento (SC). Tal comportamento pode ser atribuído à umidade removida e ao estresse celular sofrido ao longo do processo de secagem, que foi relativamente mais longo que demais tratamentos (THUWAPANICHAYANAN *et al.*, 2011).

As bananas secas tratadas com ultrassom apenas no estágio inicial (D3S 3) apresentaram maior integridade das paredes celulares e menor retração, apresentando menores valores dos parâmetros de encolhimento comparadas com as amostras tratadas com outros métodos. Com

a aplicação da energia ultrassônica, a microestrutura celular fica mais porosa, a partir da formação dos microcanais, possibilitando um maior número de vias para a difusão de água, levando, assim, a uma remoção de umidade mais rápida em direção à superfície. Também é importante destacar que a rápida evaporação da água desencadeada pela secagem pode criar um grande fluxo de vapor na superfície, o que ajuda a prevenir o colapso do tecido celular e o encolhimento (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; ZHAO *et al.*, 2019).

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

3.4 Caracterização físico-química

Todas as amostras avaliadas apresentaram atividade de água (a_w) abaixo de 0.6 (TABELA 9), o que significa que podem ser consideradas estáveis do ponto de vista químico e microbiológico. Comparada com o valor obtido pela amostra fresca (TABELA 1), observa-se que a secagem resultou em valores de a_w reduzidos em mais de 50%. Tal dado é importante, pois alimentos com elevadas a_w são mais susceptíveis ao crescimento microbiano e consequente degradação (KOWALSKI; SZADZIŃSKA, 2014; MACEDO *et al.*, 2022). O maior valor desse parâmetro foi encontrado para a técnica D3S 2 (0.551), em que as amostras foram submetidas ao ultrassom apenas no segundo estágio. Por sua vez, menor valor de a_w (0.486) foi observado para amostras submetidas ao tratamento D3S 3, no qual a energia ultrassônica foi aplicada no primeiro estágio (remoção de sólidos). Quando aplicado no primeiro estágio, o ultrassom pode resultar em uma desestabilização celular, devido ao efeito esponja e formação de microcanais, favorecendo a posterior difusão de água na secagem (MEDEIROS *et al.*, 2016; WIKTOR *et al.*, 2019).

A partir da Tabela 9 é possível observar que tanto os valores de pH quanto os de acidez titulável das amostras não se diferiram estatisticamente ($p < 0.05$). Quando comparados com o valor obtido pela amostra fresca (TABELA 1), maiores valores de acidez foram obtidos pelas

amostras secas. O pré-tratamento pela técnica de D3S com posterior secagem convectiva resulta em uma variável concentração dos constituintes do alimento, indicada, por exemplo, pelo seu teor de acidez titulável. Os valores encontrados para os parâmetros, independentemente da condição de secagem, aproximaram-se aos valores encontrados em outros estudos de secagem de fatias de banana (MACEDO *et al.*, 2020; THIPPANNA; TIWARI, 2015). A acidez é um fator relevante na aceitação sensorial e na qualidade das bananas, influenciando a percepção de sabor. Além disto, é um parâmetro que sofre grande influência da temperatura e controla atividades enzimáticas, contribuindo para a qualidade final do produto (MACEDO *et al.*, 2020).

Os dados apresentados na Tabela 9 indicam diferença significativa ($p < 0.05$) entre as amostras secas quanto aos parâmetros de cor. A não utilização de ultrassom em ambos os estágios da técnica de D3S (D3S 1) resultou no incremento dos parâmetros a^* , b^* e C^* e a diminuição dos valores de L^* . Menores valores de L^* podem indicar amostras mais escuras, com pigmentos escuros, como as melanoidinas, formadas durante o processo de secagem (MACEDO *et al.*, 2021; PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013). Comumente, menores tempos de secagem e menores temperaturas resultam em valores de L^* mais elevados, com menor formação de compostos escuros. O aumento no valor de a^* pode ser atribuído ao escurecimento que ocorre principalmente durante a etapa de incorporação de isomaltulose. Valores de b^* reduzidos inferem à lixiviação de pigmentos, principalmente decorrente do primeiro estágio da técnica de D3S. Além disto, é importante ressaltar que a oxidação de pigmentos não pode ser o principal motivo da diminuição do parâmetro b^* , pois a etapa de incorporação leva à formação de uma camada de sólidos na superfície, limitando o contato entre as amostras e o oxigênio e, assim, reduzindo reações de oxidação (CHAGURI *et al.*, 2017; VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014). A diferença de coloração entre as fatias de banana verde secas pode ser observada visualmente na Figura 3.

Figura 3 - Bananas secas pré-tratadas sob diferentes condições da técnica de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 9 - Caracterização físico-química de fatias de bananas secas submetidas a diferentes condições da técnica de D3S como pré-tratamento.

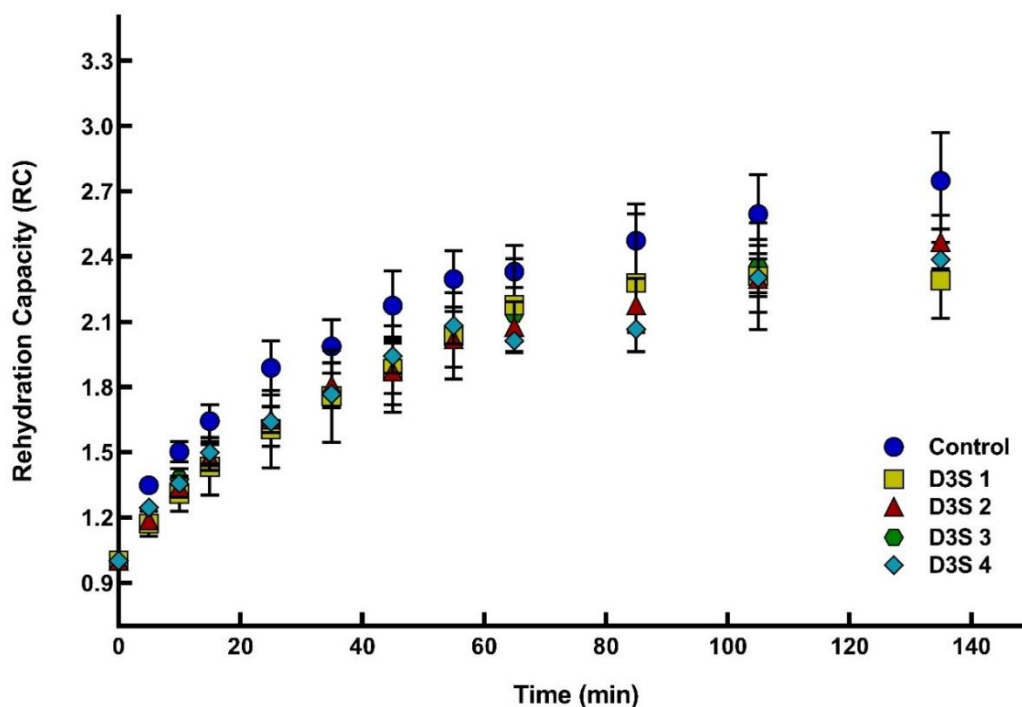
| Tratamento | a _w | pH | AT (%) | Cor | | | | |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | | | a* | b* | C* | L* | H° |
| Controle | 0.499 ± 0.013 ^{ab} | 4.947±0.023 ^a | 0.917±0.077 ^a | 5.037 ± 2.314 ^{ab} | 22.334 ± 2.531 ^b | 22.948 ±2.966 ^b | 65.541 ± 8.560 ^a | 77.767± 4.119 ^a |
| D3S 1 | 0.542 ± 0.007 ^{ab} | 4.940±0.070 ^a | 0.995±0.099 ^a | 6.495 ± 1.295 ^a | 27.670 ± 4.488 ^a | 28.425 ±4.453 ^a | 55.721 ± 4.262 ^b | 76.789± 2.559 ^a |
| D3S 2 | 0.551 ± 0.035 ^a | 5.130±0.327 ^a | 0.763±0.229 ^a | 4.190 ± 0.879 ^b | 21.197 ± 3.439 ^b | 21.620 ±3.424 ^b | 66.201 ± 5.587 ^a | 78.711± 2.504 ^a |
| D3S 3 | 0.486 ± 0.035 ^b | 5.213±0.294 ^a | 0.696±0.152 ^a | 4.262 ± 0.932 ^b | 20.446 ± 3.604 ^b | 20.886 ±3.682 ^b | 68.024 ± 5.050 ^a | 78.311± 1.482 ^a |
| D3S 4 | 0.539 ± 0.013 ^{ab} | 5.000±0.108 ^a | 0.774±0.101 ^a | 4.245 ± 1.547 ^b | 23.633 ± 4.857 ^{ab} | 23.666 ±4.163 ^{ab} | 62.004 ± 8.196 ^{ab} | 79.833± 2.887 ^a |

Em que: a_w representa atividade de água; AT representa acidez titulável e a*, b*, C*, L*, H° são parâmetros de cor. Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey (p < 0.05).

Fonte: Da autora (2022).

3.5 Capacidade de reidratação

Figura 4 - Cinética de reidratação de fatias de bananas secas submetidas previamente a diferentes condições da técnica de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

A influência da técnica de D3S aplicada previamente a processos de secagem na cinética de reidratação das fatias de banana secas foi avaliada e está demonstrada na Figura 4. A capacidade de reidratação aumentou significativamente no período inicial de 60 minutos devido ao aumento do teor de umidade, enquanto a absorção de água diminuiu à medida em que a curva da capacidade de reidratação tende ao equilíbrio. A alta taxa de absorção de água no início da reidratação pode ser atribuída à rápida reidratação dos capilares e cavidades próximas à superfície, que são rapidamente preenchidas com água (BENSEDDIK *et al.*, 2019; OZCAN-SINIR *et al.*, 2019). Não foram observadas diferenças significativas entre as amostras tratadas por diferentes condições de D3S. Entretanto, observa-se que amostras previamente tratadas com D3S apresentaram capacidade de reidratação inferior a amostras controle. Isso pode ser atribuído ao reduzido tempo de secagem das amostras controle, que induzem a menores mudanças estruturais e encolhimento mínimo, favorecendo a sua capacidade de absorção de água no processo de reidratação (ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020; TAIWO; BABALOLA, 2018). Ademais, é importante ressaltar que a técnica de D3S promove a desestabilização celular, especialmente quando há a aplicação de energia ultrassônica. A perda

da integridade celular interfere na estrutura dos capilares, resultando em menor capacidade de absorver suficientemente a água necessária para uma reidratação completa (BENSEDDIK *et al.*, 2019; ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). A incorporação de sólidos, no segundo estágio da técnica, também influencia no processo de reidratação. A isomaltulose, ao ser incorporada nas fatias de banana, promove a saturação da superfície, reduzindo o tamanho dos poros e criando uma resistência extra à difusão de água durante a reidratação. Em processos osmóticos, a influência da incorporação de açúcares na absorção de água já foi observada na literatura (BAKALIS; KARATHANOS, 2005; BOZKIR *et al.*, 2019; NOSHAD *et al.*, 2011; RODRÍGUEZ; RODRIGUEZ; MASCHERONI, 2015; TAIWO; ANGERSBACH; KNORR, 2002). A desidratação osmótica afeta as propriedades de reidratação da amostra seca devido à permeabilidade e desintegração celular oriunda do estresse osmótico, reduzindo a capacidade de absorção e retenção de água das amostras (AMAMI *et al.*, 2017; NOSHAD *et al.*, 2011).

A reidratação é um importante parâmetro de avaliação da qualidade de produtos desidratados, estando diretamente relacionada com as condições de secagem empregadas e o seu efeito na estrutura e composição do produto (ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020). Frutas e vegetais desidratados de forma eficiente apresentam menor encolhimento e conseqüente melhor reidratação (AKHIJAHANI; ARABHOSSEINI; KIANMEHR, 2017; HORUZ *et al.*, 2017). O uso de pré-tratamentos, como ultrassom, pode gerar um elevado grau de ruptura celular, pela formação de microcanais, influenciando na absorção e retenção de água pelas amostras. Em abóboras, Rojas, Silveira e Augusto (2020) relataram que amostras pré-tratadas com ultrassom obtiveram um aumento na taxa de absorção de água e na capacidade de retenção de água. Resultados semelhantes foram observados em cenouras (RICCE *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018), morangos (GAMBOA-SANTOS *et al.*, 2014; PROSAPIO; NORTON, 2018) e caquis (BOZKIR *et al.*, 2019).

4 CONCLUSÕES

O uso da técnica de *Dual-stage Sugar Substitution* (D3S) mostrou-se eficiente na incorporação de um carboidrato de baixo índice glicêmico (isomaltulose) em fatias de banana. A associação de ultrassom em ambos os estágios da técnica promoveu maior perda de água (primeiro estágio) e maior incorporação de soluto (segundo estágio).

Amostras tratadas pela técnica de D3S demandaram maiores tempos de secagem. Dentre os modelos empíricos aplicados no estudo, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou à

cinética de secagem convectiva de fatias de banana tratadas pela técnica de D3S. O modelo difusional de Fick foi satisfatório no ajuste dos dados experimentais, estimando a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A técnica de D3S aplicada como pré-tratamento à secagem convectiva resultou em valores de difusividade efetiva inferiores ao tratamento controle.

A execução da técnica de D3S sem aplicação de ultrassom (D3S 1) resultou em amostras secas com maior encolhimento longitudinal, maior encolhimento radial e maior coeficiente de encolhimento. Além disso, tal tratamento apresentou maiores valores dos parâmetros de cor a^* , b^* , C^* e menor valor L^* .

A técnica de D3S é viável na produção de um alimento com incorporação de carboidratos com baixo valor glicêmico, como a isomaltulose. O uso de energia ultrassônica em ambos os estágios da técnica resulta em melhores características físico-químicas no produto final. Porém, estudos posteriores fazem-se necessários para ajuste e adequação de novas condições de processo, como tempo de ultrassom e temperatura, visando um melhor produto final.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; KAVEH, M.; JAHANBAKHSI, A. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 43, n. 11, p. 1–17, Nov. 2019. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14178>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 34, p. 29–43, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416000072>. Acesso em: 02 out. 2020.
- AKHIJAHANI, H. S.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M. H. Comparative quality assessment of different drying procedures for plum fruits (*Prunus domestica* L.). **Czech Journal of Food Sciences**, [Prague], v. 35, n. 5, p. 449–455, Sept. 2017. Disponível em: https://www.agriculturejournals.cz/web/cjfs.htm?type=article&id=440_2016-CJFS. Acesso em: 02 out. 2020.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 59, n. 1, p. 99-104, Aug. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877402004259>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ALASALVAR, C.; SALVADÓ, J.-S.; ROS, E. Bioactives and health benefits of nuts and dried fruits. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 314, June 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31958750/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

AMAMI, E. *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 36, p. 286–300, May 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417716304473>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 18th ed. Arlington: AOAC, 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**, [New York], v. 7, n. 2, p. 185–192, Mar. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-015-9120-4>. Acesso em: 28 mar. 2022.

BAKALIS, S.; KARATHANOS, V. T. Study of rehydration of osmotically pretreated dried fruit samples. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 23, n. 3, p. 533–549, Mar. 2005. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/drt-200054129>. Acesso em: 28 mar. 2022.

BENSEDDIK, A. *et al.* Empirical and diffusion models of rehydration process of differently dried pumpkin slices. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, [Saudi Arabia], v. 18, n. 4, p. 401–410, Oct. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X17302941>. Acesso em: 02 out. 2020.

BOZKIR, H. *et al.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 54, p. 135–141, June 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417718318388>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CHAGURI, L. *et al.* Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: Modeling, physical-chemical properties, color, and texture. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 10, n. 4, p. 615–629, Apr. 2017. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/en/publicacao/129590/green-banana-musa-cavendishii-osmotic-dehydration-by-non-c/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CHANG, S. K.; ALASALVAR, C.; SHAHIDI, F. Review of dried fruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 21, p. 113–132, Mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464615005812>. Acesso em: 19 maio 2021.

CORRÊA, J. L. G. *et al.* The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 8, p. 817–826, May 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.667469>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DA SILVA JÚNIOR, E. V. *et al.* Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 97, p. 317–322, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306005>. Acesso em: 02 out. 2020.

DE MEDEIROS, R. A. B. *et al.* Dual-stage sugar substitution in *Tommy Atkins* mango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 1, p. 60–64, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/SmL3QDJLJ7Nt6dZQPtMKH4P/?lang=en>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DO CARMO, J. R. *et al.* Properties of Isomaltulose (Palatinose®) – an emerging healthy carbohydrate: Effect of temperature and solute concentration. **Journal of Molecular Liquids**, [Amsterdam], v. 347, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732221030294>. Acesso em: 02 out. 2020.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 12, p. 1509–1516, Dec. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802412256?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 09 jul. 2021.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 82, n. 2, p. 261–267, Sept. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407001240>. Acesso em: 09 jul. 2021.

GAMBOA-SANTOS, J. *et al.* Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 161, p. 40–46, Oct. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814614005093>. Acesso em: 09 jul. 2021.

GARCIA-NOGUERA, J. *et al.* Dual-stage sugar substitution in strawberries with a Stevia-based sweetener. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 11, n. 1, p. 225–230, Jan. 2010. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/187/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 76, Mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856422000182>. Acesso em: 29 mar. 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [Pavia], v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-\(I\)-Temperature-Effect-on-Henderson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d](https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-(I)-Temperature-Effect-on-Henderson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d). Acesso em: 29 mar. 2022.

HORUZ, E. *et al.* Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 230, p. 295–305, Sept. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28407914/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

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**, [Amsterdam], v. 82, p. 404–410, Sept. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643817302992>. Acesso em: 09 jul. 2021.

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**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–8, Dec. 2017. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.13250>. Acesso em: 09 jul. 2021.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 82, p. 65–70, Aug. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270114001196>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: Effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 55, n. 12, p. 5098–5105, Oct. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-018-3450-1>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, [Washington], v. 13, n. 5, p. 427-432, May 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50137a021>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Convective drying with ethanol pre-treatment of strawberry enriched with Isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 14, p. 2046–2061, Sept. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02710-2>. Acesso em: 27 jan. 2022.

- MACEDO, L. L. *et al.* Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 43, n. 9, p. 1–10, Sept. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13451>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 155, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821020715>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- MEDEIROS, R. A. B. de *et al.* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 67, p. 167–173, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815303406>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- MIERZWA, D.; KOWALSKI, S. J.; KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. **Food Technology and Biotechnology**, [Zagreb], v. 55, n. 2, p. 197–205, June 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5569343/>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- NOSHAD, M. *et al.* Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 36, n. 5, p. 383–392, Oct. 2011. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4549.2011.00593.x>. Acesso em: 29 abr. 2022.
- ODEWOLE, M. M.; OLANIYAN, A. M. Effect of osmotic dehydration pretreatments on drying rate and post-drying quality attributes of red bell pepper (*capsicum annuum*). **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [China], v. 18, n. 1, p. 226–236, Mar. 2016. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2922>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- OLIVEIRA, F. I. P. *et al.* Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 4, p. 610–615, May 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64136/1/2011_art_fipoliveira.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.
- OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with *Stevia*-based sweetener. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 90, n. 4, p. 713–718, Oct. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000107>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- OSAE, R. *et al.* Nonthermal pretreatments enhances drying kinetics and quality properties of dried ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 42, n. 5, Aug. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13117>. Acesso em: 09 jul. 2021.

OZCAN-SINIR, G. *et al.* The effect of hot air, vacuum and microwave drying on drying characteristics, rehydration capacity, color, total phenolic content and antioxidant capacity of Kumquat (*Citrus japonica*). **Food Science and Technology**, Campinas, v. 39, n. 2, p. 475–484, Apr./June 2019. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cta/a/qg6pJT8cxJDNQ987LPyrX7p/?lang=en>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. 44 p. Master (Science in Mechanical Engineering) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A.-J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 36–60, Jan. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0867-9>. Acesso em: 09 jul. 2021.

PEINADO, I. *et al.* Influence of processing on the volatile profile of strawberry spreads made with isomaltulose. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 138, n. 1, p. 621–629, May 2013a. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23265532/>. Acesso em: 09 jul. 2021.

PEINADO, I. *et al.* Optical, mechanical and sensorial properties of strawberry spreadable products formulated with isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 2353–2364, Sept. 2013b. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0970-y>. Acesso em: 29 mar. 2022.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Simultaneous application of ultrasounds and firming agents to improve the quality properties of osmotic + freeze-dried foods. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 96, p. 402–410, Oct. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818304961>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RICCE, C. *et al.* Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 89, p. 701–708, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916304215>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RODRÍGUEZ, M. M.; RODRIGUEZ, A.; MASCHERONI, R. H. Color, texture, rehydration ability and phenolic compounds of plums partially osmodehydrated and finish-dried by hot air. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 39, n. 6, p. 2647–2662, Dec. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12515>. Acesso em: 29 mar. 2021.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 61, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420302745>. Acesso em: 22 mar. 2022.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 119, p. 20–30, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308519305851>. Acesso em: 22 mar. 2022.

RUBIO-ARRAEZ, S. *et al.* Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 50, n. 9, p. 2046–2051, Sept. 2015. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijfs.12859>. Acesso em: 27 mar. 2022.

SAWALE, P. D. *et al.* Isomaltulose (Palatinose) – An emerging carbohydrate. **Food Bioscience**, [Amsterdam], v. 18, p. 46–52, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429216301808>. Acesso em: 09 jul. 2021.

SEYEDABADI, E.; KHOJASTEHPUR, M.; ABBASPOUR-FARD, M. H. Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian–Eulerian method. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 20, n. 1, p. S36–S49, May 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2017.1288134>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SHYAM, S.; RAMADAS, A.; CHANG, S. K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 48, p. 173–178, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464618303372>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TABTIANG, S.; PRACHAYAWARAKON, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 1, p. 20–28, Jan. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.613554>. Acesso em: 09 jul. 2021.

TAIWO, K. A.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Rehydration studies on pretreated and osmotically dehydrated apple slices. **Journal of Food Science**, [Malden], v. 67, n. 2, p. 842–847, Mar. 2002. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10687.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TAIWO, K. A.; BABALOLA, R. T. Studies on the drying kinetics and rehydration capacities of cardaba banana compared to plantain slices. **Open Agriculture**, [Poland], v. 3, n. 1, p. 57–71, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/opag-2018-0007/html>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TAKOUGNADI, E.; BOROZE, T.-E. T.; AZOUMA, O. Y. Effects of drying conditions on energy consumption and the nutritional and organoleptic quality of dried bananas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 268, p. 1–9, Mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419303917>. Acesso em: 09 jul. 2021.

THIPPANNA, K. S.; TIWARI, R. B. Quality changes in osmotically dehydrated banana var. 'Robusta' and 'Ney Poovan' as affected by syrup concentration and immersion time. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 52, n. 1, p. 399–406, May 2015.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-013-1008-9>. Acesso em: 29 mar. 2022.

THUWAPANICHAYANAN, R. *et al.* Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 44, n. 6, p. 1502–1510, July 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643811000041>. Acesso em: 29 mar. 2022.

TYLEWICZ, U. *et al.* Antioxidant and antimicrobial properties of organic fruits subjected to PEF-assisted osmotic dehydration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 62, June 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420302873>. Acesso em: 29 mar. 2022.

VERMA, D.; KAUSHIK, N.; RAO, P. S. Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 7, p. 1281–1297, May 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-013-1124-6>.

Acesso em: 29 mar. 2022.

VON LOESECKE, H.W. **Bananas: Chemistry, physiology**. New York: Technology Inter Science, 1950.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying**. ASAE Meeting paper No. 78-6505, St. Joseph, MI, 1978. Disponível em:

https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002003579923786. Acesso em: 29 mar. 2022.

WANG, L. *et al.* Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying.

Ultrasonics - Sonochemistry, [Amsterdam], v. 40, p. 619–628, Jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28946467/>. Acesso em: 21 mar. 2020.

WIKTOR, A. *et al.* Drying kinetics and quality of dehydrated cranberries pretreated by traditional and innovative techniques. **Journal of Food Science**, [Malden], v. 84, n. 7, p. 1820–1828, July 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31206662/>.

Acesso em: 26 mar. 2021.

ZHAO, Y.-Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 3, p. 352–362, Jan. 2019. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2018.1456449?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 29 mar. 2022.

**ARTIGO 4 - USO DO MÉTODO *DUAL-STAGE SUGAR SUBSTITUTION* E DE
ULTRASSOM NA INCORPORAÇÃO DE ISOMALTULOSE EM FATIAS DE
BANANAS IMATURAS**

Fernanda Rezende Abrahão^{1*}; Jefferson Luiz Gomes Corrêa¹; Arley de Brito Magalhães
Sousa²; Paula Giarolla Silveira¹; Renata Nepomuceno da Cunha².

¹Departamento de Ciência dos Alimentos DCA-UFLA, 32700-900, Lavras, MG, Brasil.

²Departamento de Engenharia Química, UNIPAM, 38702-054, Patos de Minas, MG, Brasil.

RESUMO

A técnica de substituição de açúcar em dois estágios (D3S) foi utilizada para incorporar isomaltulose em fatias de banana da variedade Prata imaturas. No primeiro estágio da técnica, há a desestabilização da fruta, com remoção parcial dos açúcares nativos, e no segundo estágio um açúcar de baixo índice calórico, no caso a isomaltulose, é incorporado à banana. A energia ultrassônica foi aplicada em um ou ambos estágios de forma a avaliar a sua influência no processo. O ultrassom (40 kHz) associado aos dois estágios da técnica (D3S 4) resultou em maior perda de água (4.839%) e ganho de sólidos (4.064%) pelas amostras. Comparado com o tratamento controle, o processo de D3S resultou em maiores tempos de secagem. Os modelos matemáticos utilizados para descrever o processo de secagem apresentaram bom ajuste. O modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou às cinéticas de secagem, com valores altos de R^2 (0.999) e baixos valores de SSE, E (%) e RMSE (< 0.058) para todos os tratamentos. A execução da técnica de D3S sem aplicação de ultrassom resultou em amostras secas com menor coeficiente de encolhimento e maior capacidade de reidratação. A técnica de D3S promoveu melhores características físico-químicas no produto final comparado com a amostra controle.

Palavras-chave: Difusividade de água. Enriquecimento de alimentos. Isomaltulose. Cinética de secagem.

1 INTRODUÇÃO

A banana é uma fruta de grande consumo, rica em vitaminas e nutrientes. Quando imatura, apresenta em sua composição alto teor de amido disponível, amido resistente e fibra alimentar, representando um interessante alimento e matéria-prima alimentícia (ANYASI; JIDEANI; MCHAU, 2018; LA FUENTE; ZABALAGA; TADINI, 2017; ZABALAGA; CARBALLO, 2015). A banana verde, depois de seca e processada como farinha, por exemplo, tem despertado grande interesse, especialmente pelos seus potenciais benefícios para a saúde. Além disso, seu processamento estimula o consumo de alimentos saudáveis e é uma alternativa na redução das perdas pós-colheita da fruta (LA FUENTE; ZABALAGA; TADINI, 2017; ZABALAGA; CARBALLO, 2015; ZABALAGA; LA FUENTE; TADINI, 2016). Considerando o processamento da banana verde, diferentes técnicas podem ser aplicadas, como a desidratação osmótica e de impregnação de solutos. Tais processos resultam na modificação da estrutura celular da fruta, influenciando na sua qualidade composicional, de textura e sensorial (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; SULISTYAWATI *et al.*, 2018). As técnicas de impregnação têm sido muito aplicadas em escala industrial e com diferentes propósitos, dependendo da funcionalidade dos solutos selecionados (VATANKHAH; RAMASWAMY, 2019).

Especialmente atrativa para dietas de atletas e diabéticos, a isomaltulose, conhecida como palatinose, é um carboidrato que apresenta valor calórico equivalente ao da sacarose (4 kcal/g), com grande aplicabilidade como ingrediente funcional no desenvolvimento de alimentos e bebidas com baixo índice glicêmico (DO CARMO *et al.*, 2022; MACEDO *et al.*, 2022; SAWALE *et al.*, 2017). É um soluto de digestão lenta, com potencial prebiótico além de reconhecida propriedade não-cariogênica (SHYAM; RAMADAS; CHANG, 2018). Com um intuito de enriquecimento nutricional e sensorial, sua utilização já foi avaliada em estudos de desidratação osmótica e impregnação em diferentes frutas, como limão (RUBIO-ARRAEZ *et al.*, 2015) e morango (MACEDO *et al.*, 2021, 2022; PEINADO *et al.*, 2013).

Ademais, em muitos casos, visando a otimização do processo, a impregnação de solutos em alimentos pode ser realizada com o auxílio de novas tecnologias e/ou com a aplicação de pré-tratamentos. Na literatura já foi sugerido que a desestabilização celular e a minimização do conteúdo de sólidos solúveis de frutas e vegetais podem ser obtidas a partir da imersão do alimento em água destilada submetendo-o ao ultrassom (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2011; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). A energia ultrassônica, ao penetrar na

amostra, acelera a transferência de massa do interior para superfície por meio de ondas mecânicas e a formação de microcanais, auxiliando na remoção de um expressivo percentual de sólidos em um reduzido período de tempo (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2018; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020).

Diante disto, Garcia-Noguera *et al.* (2010) propuseram uma nova técnica, denominada substituição de açúcar em dois estágios (D3S), sendo aplicada previamente a processos de secagem de frutas. No estágio inicial do D3S, pedaços da fruta são imersos em água, para a remoção dos açúcares de alto valor calórico, enquanto no estágio final objetiva-se a introdução de um adoçante, restaurando a doçura original do alimento (MEDEIROS *et al.*, 2016; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012). A técnica já foi reproduzida em maçãs (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012), manga (DE MEDEIROS *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2016) e morangos (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010), em que foi relatado que a utilização de ultrassom pode potencializar a transferência de massa (remoção de sólidos no primeiro estágio e/ou incorporação de solutos no segundo estágio).

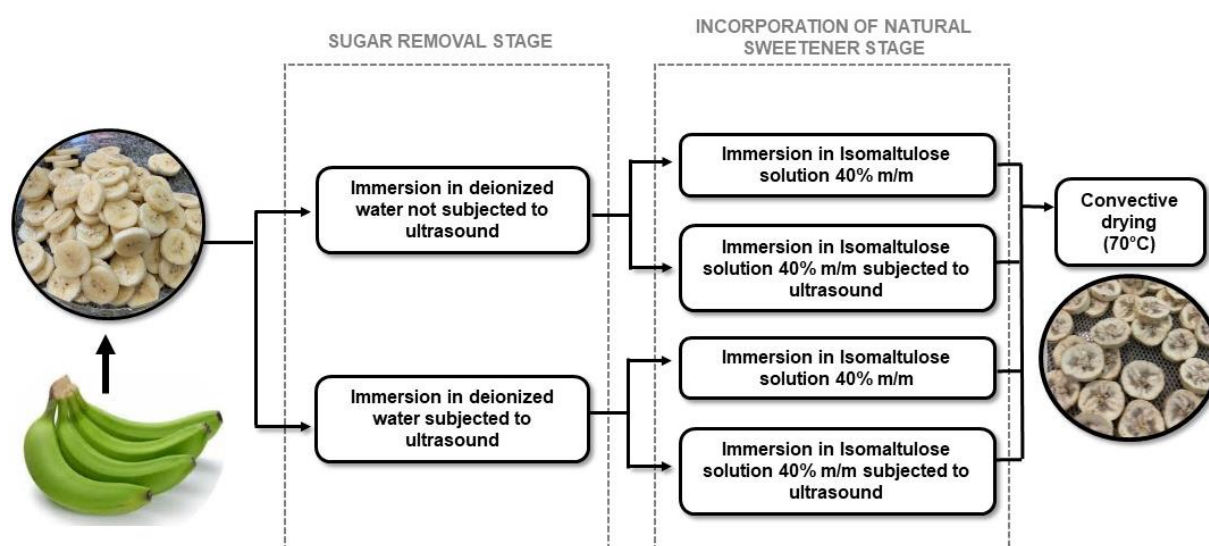
Entretanto, o processo de D3S em si é insuficiente para a garantia da estabilidade dos produtos por extensivos períodos de tempo, fazendo-se necessária uma operação unitária posterior, como a secagem convectiva. A diminuição do teor de umidade promovida pela secagem resulta em uma redução da atividade de água, minimizando o crescimento microbiano e reações enzimáticas e deteriorantes (MACEDO *et al.*, 2020). Porém, dentre as desvantagens do processo está a aplicação de temperaturas elevadas, o que pode resultar na degradação do alimento e alteração nas suas propriedades sensoriais e físico-químicas finais, como escurecimento e contração volumétrica (CORRÊA *et al.*, 2012). Além disso, quando considerados a composição química e celular dos frutos, o tipo de secagem, a variedade dos fenômenos de transporte e a influência da temperatura, a secagem de alimentos pode ser um grande desafio. Desse modo, a modelagem matemática é uma importante ferramenta para a análise do processo. O uso de equações matemáticas na previsão do comportamento da secagem permite a obtenção de condições operacionais ajustadas e adequadas através da otimização dos dados (CASTRO; MAYORGA; MORENO, 2018; ZABALAGA; CARBALLO, 2015).

O objetivo do presente estudo foi a avaliação do uso da técnica de D3S na incorporação de isomaltulose e como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de banana imaturas. O efeito da aplicação da energia ultrassônica durante ambos os estágios do processo de D3S também foi determinado. Foram avaliadas as características de secagem em camada delgada, sua modelagem matemática e a qualidade da fruta seca em termos de atividade de água, encolhimento, cor e sua capacidade de reidratação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, a técnica de D3S foi aplicada para a incorporação de isomaltulose em fatias de banana imaturas. O esquema com o *design* experimental está apresentado na Figura 1 e será explicado detalhadamente posteriormente. No primeiro estágio, ocorreu a desestabilização celular, juntamente com a remoção parcial de açúcares nativos da fruta, e no segundo estágio, a isomaltulose, um carboidrato de baixo índice glicêmico, foi incorporada na fruta visando a melhoria de sua aceitabilidade e valor nutritivo.

Figura 1 - Fluxograma de etapas da técnica de D3S aplicada em fatias de banana imaturas.



Fonte: Da autora (2022).

2.1 Preparo das amostras

Bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*, Prata variety) foram obtidas do mercado local da cidade de Patos de Minas, MG, Brasil. A seleção das frutas foi realizada com base na sua integridade e no grau de maturação através da coloração da casca pela escala de Von Loesecke (1950). Foram selecionadas bananas nos estágios 1 e 2 (verdes). As bananas imaturas apresentaram teor de umidade inicial de 2.092 ± 0.128 kg H₂O/kg d.b. As frutas foram higienizadas, descascadas manualmente e cortadas transversalmente em fatias com espessura de 0.5 ± 0.03 cm e diâmetro de 2.5 ± 0.01 cm com um cortador de inox específico. Buscando reduzir as variações, as amostras de banana de cada repetição pertenciam ao mesmo cacho.

2.2 Processo de D3S

O processo de D3S estudado foi adaptado a partir dos estudos de Garcia-Noguera *et al.* (2010) e Medeiros *et al.* (2016). Assim, 4 tratamentos foram avaliados, diferenciando-se quanto à aplicação ou não de energia ultrassônica nos estágios (TABELA 1).

Tabela 1 - Delineamento experimental aplicado no estudo.

| Denominação | Frequência Ultrassom no primeiro estágio (kHz) | Frequência Ultrassom no segundo estágio (kHz) | Concentração da solução de Isomaltulose (m/m) | Tempo de imersão no primeiro estágio (min) | Tempo de imersão no segundo estágio (min) |
|--------------------|---|--|--|---|--|
| D3S 1 | 0 | 0 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 2 | 0 | 40 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 3 | 40 | 0 | 40% | 30 | 30 |
| D3S 4 | 40 | 40 | 40% | 30 | 30 |

Fonte: Da autora (2022).

O estágio inicial do D3S baseou-se na imersão de 100 g de fatias de banana em água deionizada por 30 minutos com e sem a aplicação de ultrassom. A razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra foi de 4:1 (m/m). Os pré-tratamentos que não utilizaram energia ultrassônica foram realizados em temperatura ambiente (25.0 ± 1.0 °C). Os pré-tratamentos assistidos por energia ultrassônica foram realizados em banho ultrassônico (Modelo 03502, Quimis, São Paulo, Brasil). A frequência de operação do banho ultrassônico foi de 40 kHz e a potência volumétrica do ultrassom foi de 7.907 ± 0.658 W/L, determinada pelo método calorimétrico (LA FUENTE; TADINI, 2018). Recipientes contendo as unidades experimentais atribuídas aos pré-tratamentos com ultrassom foram colocados dentro do reservatório do banho, contendo um meio líquido de água deionizada. A temperatura de execução foi mantida em 25.0 ± 3.0 °C.

Após o período de imersão, as amostras foram retiradas dos béqueres, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água, pesadas e, então, submetidas ao segundo estágio.

O segundo estágio da técnica de D3S, que consiste na incorporação de isomaltulose, foi realizado durante 30 minutos, com solução concentrada de isomaltulose (40% m/m) com e sem

a aplicação de energia ultrassônica. A mesma razão entre o meio líquido e a quantidade de amostra (4:1 (m/m)) utilizada no primeiro estágio foi aplicada nesse estágio.

Isomaltulose (Beneo, Mannheim, Alemanha) foi utilizada como o carboidrato incorporado nas fatias de banana. A solução foi preparada a partir da diluição da quantidade requerida de sólidos em água deionizada, seguida de agitação por 10 minutos. Os experimentos que requereram energia ultrassônica na segunda etapa foram realizados no mesmo banho ultrassônico e frequência do primeiro estágio. As amostras foram acondicionadas em béqueres contendo a solução concentrada de isomaltulose e submetidas a ondas ultrassônicas por 30 minutos. As amostras foram retiradas da solução, drenadas para a retirada do excesso de solução, e pesadas.

A massa e o teor de umidade das amostras foram utilizados para calcular as variáveis respostas do experimento: perda de água (WL) e ganho de sólidos (SG), conforme as equações 1 e 2 (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

$$WL(\%) = \frac{w_i \cdot x_i - w_f \cdot x_f}{w_i} \cdot 100 \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{w_f \cdot x_{sf} - w_i \cdot x_{si}}{w_i} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que w_i é a massa inicial da amostra (kg), x_i é o teor de umidade inicial da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), w_f é a massa final da amostra, x_f é o teor de umidade final da amostra em base úmida (kg H₂O/kg), x_{sf} é o teor de sólidos totais final da amostra (kg sólido/kg) e x_{si} é o teor de sólidos totais inicial da amostra (kg/kg bs). Todos os experimentos foram realizados em triplicata e os valores apresentados são baseados nas médias encontradas.

2.3 Secagem convectiva

A secagem convectiva das amostras controle e tratadas pelo método de D3S foi executada em um secador de bandejas (Modelo PEG60, Pardal, Petrópolis, Brasil) com circulação de ar forçada com velocidade de 1.1 ± 0.3 m/s, na temperatura de 70 °C. Após a realização dos pré-tratamentos, as amostras foram dispostas em bandejas perfuradas. Para manter a condição de ar constante, apenas uma bandeja foi usada com uma única camada de amostra em cada secagem. As bandejas contendo as amostras foram pesadas em intervalos de

5 minutos durante a primeira hora, 10 minutos até a quarta hora de secagem e depois em intervalos de 20 minutos até o equilíbrio dinâmico (peso constante).

O teor de umidade das amostras durante o processo de secagem foi determinado gravimetricamente a partir do teor de umidade inicial da amostra (antes do processo de secagem). A massa da amostra foi medida em balança semianalítica (Modelo DG-15, Digimed, Brasil). A cinética de secagem foi estudada observando-se as curvas de secagem para a temperatura considerada. Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata.

2.3.1 Modelagem matemática

Os dados experimentais obtidos nos experimentos de secagem foram ajustados utilizando seis diferentes equações de secagem em camada delgada (TABELA 2). A razão de umidade (MR) das amostras durante os experimentos foi calculada usando a Eq. 3:

$$MR = \frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} \quad (3)$$

em que X_t , X_o e X_{eq} representam o teor de umidade durante a secagem, teor de umidade inicial e teor de umidade de equilíbrio (kg H₂O/kg d.b.), respectivamente (JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 2 - Equações empíricas utilizadas no ajuste das cinéticas de secagem em camada delgada.

| Modelo | Equação | Referência |
|------------------------------|--|---|
| Henderson & Pabis | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$ | Henderson e Pabis (1961) |
| Logarítmico | $MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ | Akpınar, Bicer e Yildiz (2003) |
| Midilli | $MR = -\exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$ | Abbaspour-Gilandeh, Kaveh e Jahanbakhshi (2019) |
| Newton | $MR = \exp(-k \cdot t)$ | Lewis (1921) |
| Page | $MR = \exp(-k \cdot t^n)$ | Page (1949) |
| Wang & Singh | $MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$ | Wang e Singh (1978) |

Em que: MR é a razão de umidade (adimensional), t é o tempo de secagem (min), a, b, n e k são constantes empíricas e coeficientes nas equações de secagem.

Fonte: Da autora (2022).

2.3.2 Difusividade efetiva de umidade

Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de difusão unidirecional para estimar a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A segunda lei de Fick para a difusão unidirecional foi aplicada (Eq. 4).

$$\frac{\partial X_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot (D_{eff} \cdot \frac{\partial X_t}{\partial z}) \quad (4)$$

Em que X é a umidade (kg H₂O/kg d.b.) no tempo t, D_{eff} é a difusividade efetiva (m² s⁻¹), z é uma coordenada geral (m) e t é a denotação de tempo (s). Considerando o formato e dimensão das fatias de banana, é possível assumir que não haverá difusão nas direções angular e radial e, assim, a amostra pode ser considerada como uma placa de espessura 2L. Para tal geometria, o valor de D_{eff} pode ser determinado conforme a Eq. 5.

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} 1/(2i + 1)^2 \cdot \exp(-(2i + 1)^2 \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot \frac{t}{4L^2}) \right) \quad (5)$$

Em que MR é o conteúdo de água adimensional e L é o comprimento característico (metade da espessura) (m). A condição inicial é uma quantidade inicial uniforme de água ou sólido, X(z, 0) = X_o. As condições de contorno são a simetria de concentração, $\frac{\partial X_t}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$, e o conteúdo de equilíbrio na superfície X(L, t) = X_{eq} (CORRÊA *et al.*, 2012; JUNQUEIRA *et al.*, 2017).

2.4 Encolhimento volumétrico

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

O coeficiente de encolhimento (Sh) foi determinado, conforme a Eq. 6 (SOUZA *et al.*, 2022). Esse coeficiente indica o quanto a amostra teve seu volume reduzido ao longo da secagem. Para a determinação do volume, as amostras foram consideradas como um disco.

$$Sh = \frac{V_i - V_f}{V_i} \quad (6)$$

Em que V_i é o volume inicial das fatias de banana (cm^3) e V_f é o volume das fatias ao final da secagem convectiva (cm^3).

2.5 Caracterização físico-química

2.5.1 Teor de umidade e atividade de água (a_w)

O teor de umidade das amostras secas foi determinado gravimetricamente em estufa a vácuo a $70\text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC, 2010). A determinação da atividade de água foi realizada em um higrômetro (Aqualab, modelo 3-TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA). As análises foram realizadas em triplicata.

2.5.2 Acidez titulável e pH

Para a determinação da acidez titulável e leitura do pH, 2.0 g de amostras foram triturados e homogeneizados com 50 mL de água deionizada. Na determinação da acidez titulável, três gotas de fenolftaleína foram adicionadas e as amostras foram tituladas com solução de hidróxido de sódio 0.1N. Os resultados foram expressos em percentagem (g de ácido málico em 100 g de amostra) (MACEDO *et al.*, 2020). A leitura do pH foi realizada por um pHmêtro de bancada digital (Modelo DM-22, Digimed). Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

2.5.3 Análise colorimétrica

A coloração da superfície das amostras secas foi analisada a partir de um colorímetro digital (Minolta, Modelo CR-400, Osaka, Japão). As medidas foram realizadas em três diferentes posições em cada amostra. O sistema de coordenadas CIELAB (L^* , a^* e b^*) foi mensurado com iluminante D65, em que L^* expressa a claridade (100 para branco a 0 para preto), a^* indica vermelho quando positivo e verde quando negativo, b^* indica amarelo quando

positivo e azul quando negativo. (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Os valores do Chroma (C^*) e tonalidade (H°) foram calculados de acordo com a Eq. 7 e a Eq. 8, respectivamente.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (7)$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (8)$$

2.6 Capacidade de reidratação

A avaliação da capacidade de absorção de água das amostras secas foi determinada por meio da capacidade de reidratação (RC). As amostras secas (aproximadamente 1 g) foram imersas em 150 mL de água deionizada a 25 ± 2 °C. Em intervalos de tempo pré-determinados, as amostras foram removidas da água, depositadas em papel absorvente para retirada do excesso de água e pesadas. A variação da massa das amostras foi utilizada para a avaliação do processo de reidratação, conforme a Eq. 9 (JUNQUEIRA *et al.*, 2017). Todos os testes foram realizados em quadruplicata e os valores médios foram utilizados para os cálculos.

$$RC = \frac{\text{massa das amostras reidratadas}}{\text{massa das amostras secas}} \quad (9)$$

2.7 Análise estatística

Os parâmetros e constantes das equações empíricas foram estimados, correlacionando-se os modelos matemáticos aos dados experimentais, com o uso da regressão não linear pelo método Quase-Newton ao nível de 5% de significância, pelo *software* Statistica7.0® (StatSoft Inc., Tulsa, OK). A avaliação dos modelos aplicados foi baseada no maior coeficiente de determinação (R^2) e no menor valor do desvio médio relativo (E%) (Eq. 10), em que m_i é o valor experimental, m_p é o valor previsto e N é o tamanho da amostra. Outros parâmetros estatísticos, como a soma do erro quadrático (SSE) (Eq. 11) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (Eq. 12), também foram utilizados para avaliar e comparar a qualidade do ajuste.

$$E (\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad (10)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (mi - mp)^2 \quad (11)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (mi - mp)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Para a avaliação dos resultados das análises qualitativas, aplicou-se ANOVA, seguida do teste de Tukey, ambos considerando um nível de significância de 5%, utilizando o *software* Sisvar 5.8 (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito dos pré-tratamentos

Os efeitos das etapas da técnica de D3S na perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e umidade final (X) das amostras de banana verde estão apresentados na Tabela 3. Na etapa de remoção de açúcares (primeiro estágio), as fatias de banana perderam sólidos ($-1.499 \pm 0.324\%$) e ganharam aproximadamente 13 a 16% de água. Esse comportamento é devido ao gradiente de concentração, que favorece a transferência de massa de sólidos das fatias de banana para o meio líquido e a transferência de água do meio líquido para a fruta (AZOUBEL *et al.*, 2010; DA SILVA *et al.*, 2016; SILVA JUNIOR *et al.*, 2018). Como consequência, há um aumento do teor de umidade de até 37% em 30 minutos. Observa-se que o primeiro estágio resultou em uma desestabilização celular, com perda de açúcares, principalmente glicose e frutose, e para fins práticos considera-se tal perda igual à perda de sólidos solúveis (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012).

Tabela 3 - Média de valores de perda de água (WL), ganho de sólidos (SG) e teor de umidade das amostras após a aplicação das etapas da técnica de D3S.

| Etapa | WL (%) | SG (%) | X (kg H ₂ O/kg d.b.) |
|-------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| D3S 1 | 4.238 ± 0.694 ^a | 3.278 ± 0.250 ^{ab} | 2.368 ± 0.036 ^{ab} |
| D3S 2 | 2.882 ± 1.226 ^a | 3.029 ± 0.514 ^b | 2.433 ± 0.055 ^a |
| D3S 3 | 4.832 ± 0.412 ^a | 3.195 ± 0.237 ^b | 2.426 ± 0.021 ^a |
| D3S 4 | 4.839 ± 0.381 ^a | 4.064 ± 0.212 ^a | 2.296 ± 0.029 ^b |

Em que US representa ultrassom, SG representa ganho de sólidos e WL representa perda de água. Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

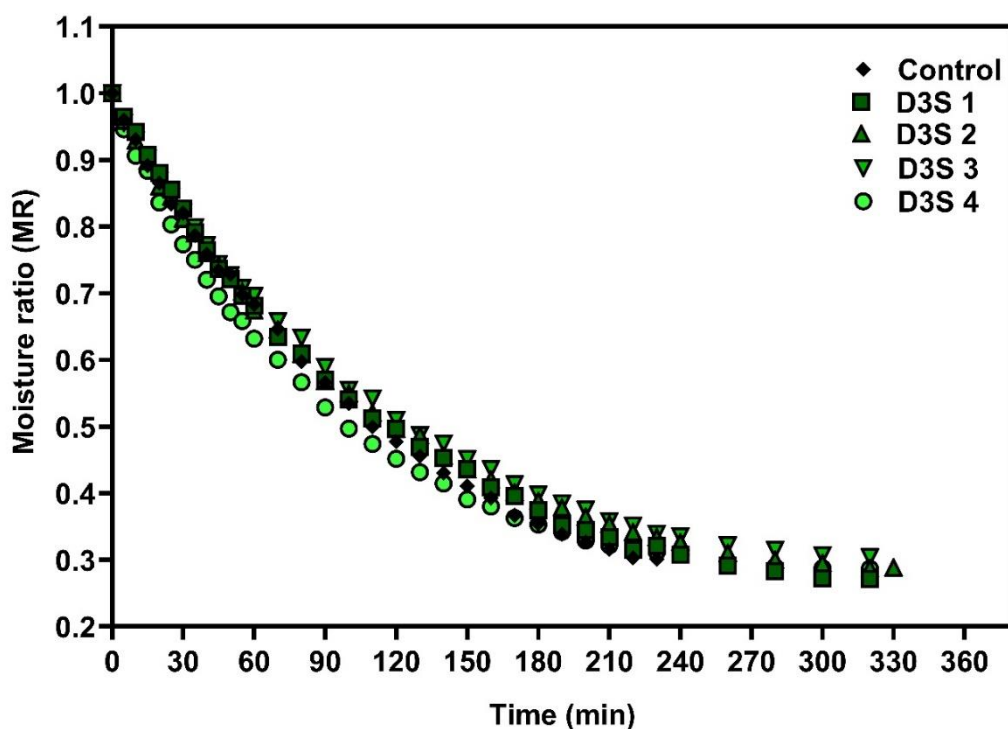
Fonte: Da autora (2022).

A aplicação de ultrassom em ambos os estágios da técnica de D3S resultou em maior incorporação de solutos pelas amostras (4.064%). No estágio inicial, as amostras submetidas a energia ultrassônica apresentam um desequilíbrio estrutural, decorrente da cavitação e formação de microcanais na parede celular, que induz a uma maior transferência de massa. Além disso, como a parede celular já foi desestabilizada pelas ondas ultrassônicas no primeiro estágio, a incorporação de solutos será facilitada na etapa posterior, devido ao gradiente de concentração existente entre a fruta e a solução de isomaltulose. Em estudos de D3S com manga (DE MEDEIROS *et al.*, 2019) e maçã (OLIVEIRA; RODRIGUES; FERNANDES, 2012), foi observado que a aplicação do ultrassom, em ambos os estágios, resultou em ganho de sólidos relativamente maior do que amostras sem tratamento ultrassônico. Garcia-Noguera *et al.* (2010) observaram em seu estudo que a incorporação de estévia em morangos foi maior quando o segundo estágio foi realizado sem ultrassom. Os autores relataram que a energia ultrassônica induz a uma extração de sólidos solúveis das amostras, reduzindo a incorporação de outros açúcares.

3.2 Cinética de secagem e modelagem matemática

De maneira a avaliar a influência das diferentes condições da técnica de D3S na cinética de secagem das fatias de banana verdes, o teor de umidade adimensional (até o ponto de equilíbrio dinâmico) e sua variação durante o processo de secagem é representado na Figura 2. O tempo médio de secagem de cada tratamento e a umidade final estão apresentados na Tabela 4.

Figura 2 - Variação da razão de umidade (MR) com o tempo de secagem de fatias de banana verde submetidas a diferentes condições de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 4 - Tempo médio de secagem e teor de umidade (X) das fatias de banana verde submetidas a diferentes condições de D3S e posterior secagem convectiva.

| Tratamento | Tempo (min) | X (kg H ₂ O/kg d.b.) |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Controle | 233.33 ± 5.77 ^b | 0.094 ± 0.007 ^a |
| D3S 1 | 306.00 ± 11.55 ^a | 0.139 ± 0.038 ^a |
| D3S 2 | 323.33 ± 20.82 ^a | 0.134 ± 0.050 ^a |
| D3S 3 | 330.00 ± 14.14 ^a | 0.151 ± 0.030 ^a |
| D3S 4 | 320.00 ± 0.01 ^a | 0.117 ± 0.009 ^a |

Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

Fonte: Da autora (2022).

Como esperado, o teor de umidade das amostras reduziu com o tempo de secagem, apresentando um declínio exponencial (FIGURA 2). No início da secagem, o processo é controlado principalmente pelo mecanismo de difusão, com a razão de umidade diminuindo rapidamente, até que, gradualmente, o teor de umidade de equilíbrio seja atingido (BOZKIR *et*

al., 2019; LA FUENTE; TADINI, 2018; TAKOUGNADI; BOROZE; AZOUMA, 2020). De maneira geral, as amostras submetidas a diferentes condições da técnica de D3S apresentaram curvas de secagem similares à amostra controle, independentemente da aplicação ou não de ultrassom durante os estágios. O tempo médio de secagem (TABELA 4) das amostras tratadas com a técnica de D3S variou entre 306 a 330 minutos, valores relativamente maiores do que o tempo médio obtido pela amostra controle (233 minutos). A umidade final média das amostras mostrou-se estatisticamente similar ($p < 0.05$) entre os diferentes tratamentos e a amostra controle.

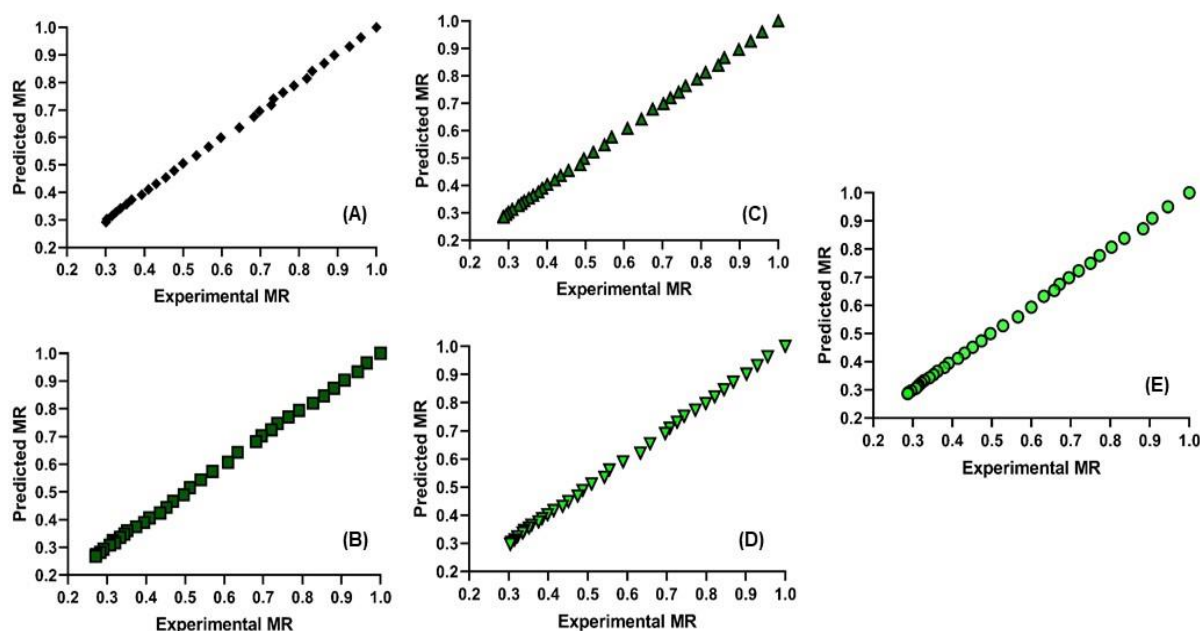
Como pode ser observado, o uso da técnica de D3S como pré-tratamento na secagem convectiva de fatias de banana verde não resultou em tempos médios de secagem reduzidos quando comparado com as amostras controle (TABELA 4). A formação de uma camada de soluto na superfície da fruta após o segundo estágio pode ter dificultado o fluxo de água, reduzindo a difusividade e aumentando, conseqüentemente, o tempo de secagem (AHMED; QAZI; JAMAL, 2016; MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017). A incorporação de solutos por processo osmótico promoveu resultados semelhantes na secagem de cenoura (MIERZWA; KOWALSKI; KROEHNKE, 2017), banana (TABTIANG; PRACHAYAWARAKON; SOPONRONNARIT, 2012), morango (MACEDO *et al.*, 2022) e mamão (AZOUBEL *et al.*, 2015).

Embora o uso de energia ultrassônica tenha se mostrado relevante na redução do tempo de secagem em alguns trabalhos recentes (AMAMI *et al.*, 2017; FIJALKOWSKA *et al.*, 2015; LA FUENTE; TADINI, 2018; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020; TÜFEKÇI; ÖZKAL, 2017; WANG *et al.*, 2018), os resultados encontrados no presente estudo foram divergentes. O uso de ultrassom em um ou ambos estágios da técnica de D3S não promoveu a redução no tempo final de secagem das fatias de banana. Alguns fatores podem ter sido relevantes para tal fato, como a frequência das ondas ultrassônicas aplicadas e a potência do equipamento. As condições de ultrassom selecionadas (40 kHz e potência de 70 W) podem ser responsáveis pela baixa influência da tecnologia na cinética de secagem das amostras. A taxa de cavitações e compressões alternadas em um alimento depende da frequência das ondas ultrassônicas aplicadas. La Fuente e Tadini (2018) observaram que o uso de pré-tratamento ultrassônico por 25 minutos com potência nominal de 154 W e baixa frequência (25 kHz) promoveu redução de 9% no tempo de secagem de fatias de banana imaturas. Os autores afirmam, que a aplicação de baixas frequências de ultrassom resulta em séries menores de compressão e expansão através do meio sólido (LA FUENTE; TADINI, 2018). As ondas ultrassônicas em frequências mais baixas são mais longas, possibilitando efeitos mais intensos durante a transmissão e, portanto,

uma potência ultrassônica maior em frequências mais baixas é ideal em processos de transferência de umidade em alimentos (ZHANG *et al.*, 2016).

Os parâmetros de ajustes, constantes e critérios de comparação das equações matemáticas utilizadas no estudo estão apresentados na Tabela 5. Os modelos matemáticos aplicados aos dados experimentais apresentaram bom ajuste, obtendo valores elevados de R^2 , variando de 0.963 a 0.999. Além disso, é possível observar que dentre as equações para secagem em camada delgada testadas, as equações Logarítmica e de Midilli melhor representaram o processo de secagem de fatias de banana verde, com valores altos de R^2 (0.999) e baixos valores de SSE, E (%) e RMSE (< 0.058) para todos os tratamentos. O bom ajuste do modelo de Midilli também pode ser observado pela distribuição dos valores de MR preditos com os valores de MR experimentais (FIGURA 3), em que os dados estão agrupados em torno de uma linha reta com inclinação próxima de 45° . Resultado semelhante foi observado em estudos com bananas maduras secas (MACEDO *et al.*, 2020) e bananas verdes secas (LA FUENTE; TADINI, 2018), nos quais a aplicação do modelo de Midilli melhor representou a cinética de secagem da fruta em todas as temperaturas testadas.

Figura 3 - Comparação dos valores de razão de umidade (MR) experimental e preditos de acordo com a equação de Midilli para a secagem de fatias de banana verde pré-tratadas pela técnica de D3S.



Em que: (A) amostra controle, (B) D3S 1, (C) D3S 2, (D) D3S 3 e (E) D3S 4.

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 5 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana verde submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Continua).

| Modelo | Parâmetros | R² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|----------------------|--------------|----------------------|-------------|
| Controle | | | | | |
| Page | k = 0.011; n = 0.882 | 0.999 | 0.175 | 1 x 10 ⁻⁴ | 0.008 |
| Newton | k = 0.006 | 0.996 | 0.402 | 0.002 | 0.046 |
| Logarítmico | a = 0.832; b = 0.008; k = 0.161 | 0.999 | 0.006 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 13 x 10 ⁻⁶ | 0.998 | 0.391 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.127 |
| Henderson & Pabis | a = 0.969; k = 0.006 | 0.997 | 0.572 | 2 x 10 ⁻⁴ | 0.015 |
| Midilli | k = 0.008; n = 0.958; b = 3x10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.036 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| D3S 1 | | | | | |
| Page | k = 0.013; n = 0.822 | 0.997 | 0.653 | 3 x 10 ⁻⁴ | 0.018 |
| Newton | k = 0.006 | 0.987 | 1.514 | 0.001 | 0.036 |
| Logarítmico | a = 0.789; b = 0.009; k = 0.214 | 0.999 | 0.018 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.006 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 10 x 10 ⁻⁶ | 0.995 | 0.525 | 5 x 10 ⁻⁴ | 0.022 |
| Henderson & Pabis | a = 0.954; k = 0.005 | 0.991 | 1.498 | 9 x 10 ⁻⁴ | 0.030 |
| Midilli | k = 0.008; n = 0.979; b = 5x10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.011 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.006 |
| D3S 2 | | | | | |
| Page | k = 0.017; n = 0.768 | 0.997 | 0.593 | 3 x 10 ⁻⁴ | 0.018 |
| Newton | k = 0.005 | 0.978 | 1.511 | 0.002 | 0.046 |
| Logarítmico | a = 0.749; b = 0.009; k = 0.244 | 0.999 | 0.008 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.004 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 10 x 10 ⁻⁶ | 0.992 | 0.786 | 8 x 10 ⁻⁴ | 0.028 |
| Henderson & Pabis | a = 0.933; k = 0.005 | 0.987 | 1.540 | 0.001 | 0.035 |
| Midilli | k = 0.009; n = 0.936; b = 5x10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.010 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.003 |
| D3S 3 | | | | | |
| Page | k = 0.015; n = 0.785 | 0.997 | 0.441 | 3 x 10 ⁻⁴ | 0.167 |
| Newton | k = 0.005 | 0.982 | 0.949 | 0.002 | 0.041 |
| Logarítmico | a = 0.747; b = 0.009; k = 0.245 | 0.999 | 0.013 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| Wang & Singh | a = - 0.005; b = 10 x 10 ⁻⁶ | 0.994 | 0.677 | 0.005 | 0.023 |
| Henderson & Pabis | a = 0.940; k = 0.005 | 0.989 | 1.162 | 0.001 | 0.031 |
| Midilli | k = 0.009; n = 0.945; b = 5x10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.049 | 2 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |

Tabela 5 - Valores das constantes e parâmetros dos modelos matemáticos para secagem em camada delgada de fatias de banana verde submetidas a diferentes condições da técnica de D3S (Conclusão).

| Modelo | Parâmetros | R ² | E (%) | SSE | RMSE |
|-------------------|--|----------------|-------|----------------------|-------|
| D3S 4 | | | | | |
| Page | k = 0.024; n = 0.717 | 0.995 | 0.649 | 5 x 10 ⁻⁴ | 0.022 |
| Newton | k = 0.006 | 0.963 | 2.178 | 0.003 | 0.059 |
| Logarítmico | a = 0.731; b = 0.011; k = 0.258 | 0.999 | 0.014 | 3 x 10 ⁻⁵ | 0.005 |
| Wang & Singh | a = - 0.006; b = 13 × 10 ⁻⁶ | 0.985 | 1.051 | 0.001 | 0.037 |
| Henderson & Pabis | a = 0.909; k = 0.005 | 0.979 | 1.895 | 0.002 | 0.044 |
| Midilli | k = 0.013; n = 0.907; b = 6×10 ⁻⁴ | 0.999 | 0.020 | 1 x 10 ⁻⁵ | 0.003 |

Em que: a, b, n são os parâmetros e k a constante dos modelos matemáticos.

Fonte: Da autora (2022).

Tabela 6 - Coeficiente de difusividade efetiva (D_{eff}) de água das amostras secas.

| Tratamento | D _{eff} × 10 ¹¹ (m ² s ⁻¹) | R ² |
|------------|---|----------------|
| Controle | 1.68 ± 0.07 | 0.979 |
| D3S 1 | 1.58 ± 0.09 | 0.986 |
| D3S 2 | 1.59 ± 0.16 | 0.987 |
| D3S 3 | 1.56 ± 0.04 | 0.986 |
| D3S 4 | 1.72 ± 0.14 | 0.988 |

Em que: D_{eff} é coeficiente de difusividade de Fick; R² é o coeficiente de correlação.

Fonte: Da autora (2022).

Os valores do coeficiente de difusividade de água (D_{eff}), calculados a partir da relação de Fick (Eq. 5) estão apresentados na Tabela 6. É possível observar que amostras que foram submetidas a energia ultrassônica em ambos os estágios do D3S (D3S 4) apresentaram maior valor de D_{eff} (1.72 × 10⁻¹¹ m².s⁻¹) quando comparadas ao tratamento controle e demais tratamentos, possivelmente devido à desestabilização celular, oriunda da formação de microcanais na parede celular. Resultado similar foi obtido em estudo com banana verde, no qual a aplicação da energia ultrassônica resultou em um aumento de 4.8% na difusividade efetiva de umidade (LA FUENTE; TADINI, 2018). Em caquis, a difusividade efetiva de água aumentou 21% quando as amostras foram pré-tratadas com desidratação osmótica assistida por ultrassom. Os autores também relataram que o uso de ultrassom previamente à secagem com ar quente, elevou a difusividade efetiva de água e aumentou a taxa de secagem (BOZKIR *et al.*, 2019). Quando associada ao etanol como pré-tratamento, a aplicação de US promoveu maiores

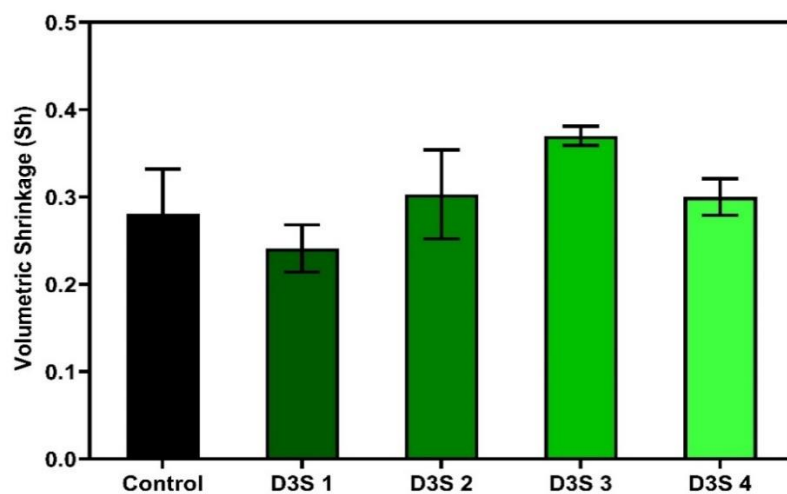
valores de difusividade em bananas, apresentando uma tendência crescente com o aumento do tempo de tratamento (GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022).

Além disso, observa-se que o tratamento controle resultou em valor de D_{eff} relativamente maior ($1.68 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) que o encontrado na maioria das amostras submetidas à técnica de D3S. Isso pode ser explicado pelas mudanças físicas e químicas nas fatias de banana, principalmente durante o estágio final, de incorporação de isomaltulose, que resultam em diferentes taxas de secagem e conseqüente reduzido valor de difusividade. A etapa de incorporação promove uma saturação da superfície das amostras com moléculas de isomaltulose, criando uma resistência extra para os processos de transferência de calor e de massa. Macedo *et al.* (2021) também observaram que amostras que tiveram incorporação de sólidos apresentaram uma tendência de demanda por maior tempo de secagem. Os autores correlacionaram isso com a maior incorporação de soluto durante processos osmóticos, aumentando a quantidade e a força das ligações de água com o alimento, dificultando a perda de umidade.

3.3 Encolhimento volumétrico

Importante parâmetro de qualidade de frutas desidratadas, o encolhimento volumétrico é uma alteração física inerente ao processo de secagem (MACEDO *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2022). A perda de água juntamente com o ar quente da secagem causa estresse ao tecido celular, alterando sua microestrutura e promovendo o seu encolhimento (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017). Os valores dos coeficientes de encolhimento (Sh) das fatias de banana verde secas estão representados na Figura 4. Para melhor comparação, os valores apresentados foram calculados a partir das medidas de diâmetro e espessura das amostras no final da secagem convectiva.

Figura 4 - Coeficientes de encolhimento volumétrico de fatias de banana verde incorporadas de isomaltulose pela técnica de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

As bananas secas tratadas com ultrassom apenas no estágio inicial (D3S 3) apresentaram menor integridade das paredes celulares e maior retração, apresentando maiores valores de encolhimento comparadas com as amostras tratadas com outros métodos. Amostras que não foram submetidas ao ultrassom, em nenhum estágio da técnica de D3S apresentaram menor encolhimento do seu volume. Resultado similar foi observado por Granella, Bechlin e Christ (2022), em que a aplicação do ultrassom reduziu em até 49.4% a espessura de fatias de banana secas, justificado pelo maior enfraquecimento e degradação do tecido celular. Com a aplicação da energia ultrassônica, a microestrutura celular fica mais porosa, a partir da formação dos microcanais, possibilitando um maior número de vias para a difusão de água, levando, assim, a uma remoção de umidade mais rápida em direção à superfície (ABBASPOUR-GILANDEH; KAVEH; JAHANBAKHSI, 2019; DEGHANNYA; GORBANI; GHANBARZADEH, 2016; ZHAO *et al.*, 2019).

A perda de umidade durante a secagem promove a redução do volume das fatias de banana, pelo fato de a água ser um dos componentes majoritários na sua composição. O encolhimento das fatias da fruta aumenta com o volume de água removido, pois quanto maior o teor de umidade removido, mais tensões de contração são originadas na sua estrutura (AMAMI *et al.*, 2017; GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022). Segundo Corrêa *et al.* (2012), o encolhimento de fatias de banana durante a secagem convectiva tem uma relação linear com a razão de umidade. É importante destacar que a rápida evaporação da água desencadeada pela secagem pode criar um grande fluxo de vapor na superfície, o que ajuda a prevenir o colapso do tecido celular e o encolhimento de alimentos (FERNANDES;

RODRIGUES, 2008; ZHAO *et al.*, 2019). Ademais, é importante destacar que o encolhimento pode ser influenciado por diversos fatores, como o grau de maturação da fruta, a sua variedade e condições de secagem (umidade do ar, velocidade do ar, temperatura e teor de umidade final), dificultando a comparação com outros trabalhos.

3.4 Caracterização físico-química

Todas as amostras avaliadas apresentaram atividade de água (a_w) abaixo de 0.6 (TABELA 7), não demonstrando diferença estatística ($p < 0.05$) entre si. Os valores de a_w encontrados são relevantes, pois inferem que as amostras secas podem ser consideradas estáveis do ponto de vista químico e microbiológico. Alimentos com elevadas a_w são mais susceptíveis a reações enzimáticas, ao crescimento microbiano e consequente degradação (KOWALSKI; SZADZIŃSKA, 2014; MACEDO *et al.*, 2022; SOUZA *et al.*, 2022). A redução da a_w das amostras pré-tratadas pela técnica de D3S é consequência da remoção da água através das membranas celulares via pressão osmótica (primeiro e segundo estágios) e subsequente fluxo ao longo do espaço intercelular antes da difusão para a solução hipertônica (segundo estágio) (UDOMKUN; INNAWONG, 2018).

A partir da Tabela 7 é possível observar que os valores de pH das fatias de banana secas não se diferiram estatisticamente ($p < 0.05$). Quanto aos teores de acidez titulável, amostras que não foram submetidas ao ultrassom no primeiro estágio (D3S 1 e D3S 2) obtiveram maiores valores (0.680 e 0.779, respectivamente). Ao ser associado ao primeiro estágio da técnica de D3S, o ultrassom, através da formação de microcanais e desestabilização celular, promove a lixiviação de compostos nativos da fruta para o meio líquido, como açúcares, compostos fenólicos e ácidos (ABRAHÃO; CORRÊA, 2021; AZOUBEL *et al.*, 2010; GRANELLA; BECHLIN; CHRIST, 2022; OSAE *et al.*, 2019). Ademais, o pré-tratamento pela técnica de D3S com posterior secagem convectiva resulta em uma variável concentração dos constituintes do alimento, indicada, por exemplo, pelo seu teor de acidez titulável. Os valores encontrados para os parâmetros, independentemente da condição de secagem, aproximaram-se aos valores encontrados em outros estudos de secagem de fatias de banana (MACEDO *et al.*, 2020; THIPPANNA; TIWARI, 2015). A acidez é um fator relevante na aceitação sensorial e na qualidade das bananas, influenciando a percepção de sabor. Além disso, é um parâmetro que sofre grande influência da temperatura e controla atividades enzimáticas, contribuindo para a qualidade final do produto. Comumente, quanto maior a temperatura de secagem dos alimentos, menor é o seu teor de acidez (MACEDO *et al.*, 2020).

A cor dos alimentos é importante parâmetro, influenciando na aceitação do produto e informando sobre alguns aspectos da sua qualidade (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017; MACEDO *et al.*, 2021; OSAE *et al.*, 2019). A exposição do alimento ao ar aquecido pode resultar em reações químicas responsáveis pela alteração de sua coloração, como escurecimento enzimático e não-enzimático. A diferença de coloração entre as fatias de banana verde secas pode ser observada visualmente na Figura 5. Os dados apresentados na Tabela 7 indicam significativa diferença ($p < 0.05$) entre as amostras secas quanto aos parâmetros de cor. Comparada com as amostras controle, a aplicação de pré-tratamentos nas fatias de banana resultou no incremento dos parâmetros a^* , b^* , C^* e H° . Para o parâmetro L^* não foi observada diferença estatística significativa ($p < 0.05$) entre as amostras. Menores valores de L^* podem indicar amostras mais escuras, com pigmentos escuros, como as melanoidinas, formadas durante o processo de secagem (MACEDO *et al.*, 2021; PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013). Comumente, menores tempos de secagem e menores temperaturas resultam em valores de L^* mais elevados, com menor formação de compostos escuros. O aumento no valor de a^* pode ser atribuído ao escurecimento que ocorre principalmente durante a etapa de incorporação de isomaltulose. O reduzido valor de b^* encontrado nas amostras controle pode estar associado à oxidação de pigmentos. Na técnica de D3S, durante a etapa de incorporação, há a formação de uma camada de sólidos na superfície, limitando o contato entre as amostras e o oxigênio e, assim, reduzindo reações de oxidação (CHAGURI *et al.*, 2017; VERMA; KAUSHIK; RAO, 2014).

Figura 5 - Bananas imaturas secas pré-tratadas sob diferentes condições da técnica de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

Tabela 7 - Caracterização físico-química de fatias de banana verde secas submetidas a diferentes condições da técnica de D3S como pré-tratamento.

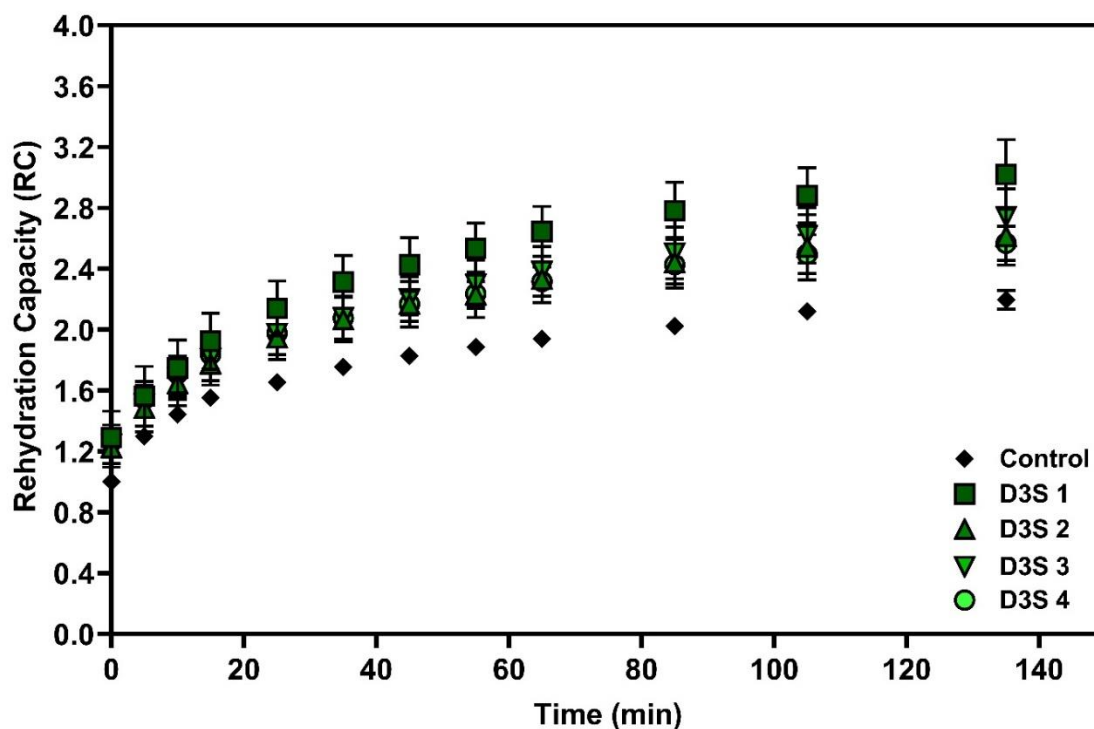
| Tratamento | a _w | pH | AT (%) | Cor | | | | |
|------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | | a* | b* | C* | L* | H° |
| Controle | 0.519 ± 0.004 ^a | 6.107±0.123 ^a | 0.442 ±0.083 ^b | 3.354± 0.782 ^c | 13.590 ± 2.323 ^b | 14.012 ±2.362 ^c | 50.064 ±28.423 ^a | 76.089 ± 2.918 ^b |
| D3S 1 | 0.554 ± 0.042 ^a | 5.650±0.610 ^a | 0.680 ±0.117 ^{ab} | 4.607 ± 0.754 ^a | 19.282 ± 1.800 ^a | 19.829 ±1.857 ^{ab} | 66.793 ±3.573 ^a | 76.656 ± 1.721 ^b |
| D3S 2 | 0.531 ± 0.056 ^a | 5.510±0.551 ^a | 0.779 ±0.117 ^a | 4.174± 0.499 ^{ab} | 16.926 ± 1.852 ^a | 17.457 ±1.827 ^b | 67.832 ±4.835 ^a | 76.233 ± 1.734 ^b |
| D3S 3 | 0.504 ± 0.042 ^a | 5.943±0.384 ^a | 0.420 ±0.096 ^b | 3.583± 0.363 ^{bc} | 17.472 ± 2.100 ^a | 18.309 ±1.340 ^{bc} | 44.033 ±27.459 ^a | 78.511 ± 1.868 ^a |
| D3S 4 | 0.472 ± 0.009 ^a | 5.967±0.012 ^a | 0.453 ±0.019 ^b | 3.229 ± 0.376 ^c | 19.988 ± 3,721 ^a | 20.804 ±2.783 ^a | 67.168 ±2.626 ^a | 80.756 ± 2.303 ^a |

Em que: a_w representa atividade de água; AT representa acidez titulável e a*, b*, C*, L*, H° são parâmetros de cor. Média de três repetições ± desvio padrão. Na coluna, letras iguais indicam que não há diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey (p < 0.05).

Fonte: Da autora (2022).

3.5 Capacidade de reidratação

Figura 6 - Cinética de reidratação de fatias de banana verde secas submetidas previamente a diferentes condições da técnica de D3S.



Fonte: Da autora (2022).

A influência da técnica de D3S na cinética de reidratação das fatias de banana verde secas foi avaliada e está demonstrada na Figura 6. A capacidade de reidratação aumentou significativamente no período inicial de 70 minutos devido ao aumento do teor de umidade, enquanto a absorção de água diminuiu à medida em que a curva da capacidade de reidratação tende ao equilíbrio. A alta taxa de absorção de água no início da reidratação pode ser atribuída à rápida reidratação dos capilares e cavidades próximas à superfície da amostra, que são rapidamente preenchidas com água (BENSEDDIK *et al.*, 2019; OZCAN-SINIR *et al.*, 2019). Amostras pré-tratadas por D3S sem aplicação de energia ultrassônica (D3S 1) apresentaram maior capacidade de reidratação que demais amostras. Além disto, observa-se que amostras previamente tratadas com D3S apresentaram capacidade de reidratação estatisticamente superior ao controle. É importante ressaltar que a técnica de D3S promove a desestabilização celular, especialmente quando há a aplicação de energia ultrassônica. A perda da integridade celular interfere na estrutura dos capilares, resultando em menor capacidade de absorver suficientemente a água necessária para uma reidratação completa (BENSEDDIK *et al.*, 2019; ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020; ROJAS; SILVEIRA; AUGUSTO, 2020). A

incorporação de solutos, no estágio final da técnica, também influencia no processo de reidratação. A isomaltulose, ao ser incorporada nas fatias de banana verde, promove a saturação da superfície, reduzindo o tamanho dos poros e criando uma resistência extra à difusão de água durante a reidratação. Em processos osmóticos, a influência da incorporação de açúcares na absorção de água já foi observada na literatura (BAKALIS; KARATHANOS, 2005; BOZKIR *et al.*, 2019; NOSHAD *et al.*, 2011; RODRÍGUEZ; RODRIGUEZ; MASCHERONI, 2015; TAIWO; ANGERSBACH; KNORR, 2002). A desidratação osmótica afeta as propriedades de reidratação da amostra seca devido à permeabilidade e desintegração celular oriunda do estresse osmótico, reduzindo a capacidade de absorção e retenção de água das amostras (AMAMI *et al.*, 2017; NOSHAD *et al.*, 2011).

A reidratação é um relevante parâmetro de avaliação da qualidade de produtos desidratados, estando diretamente relacionada com as condições de secagem empregadas e o seu efeito na estrutura e composição do produto (ROJAS; AUGUSTO; CÁRCEL, 2020). Frutas e vegetais desidratados de forma eficiente apresentam menor encolhimento e conseqüente melhor reidratação (AKHIJAHANI; ARABHOSSEINI; KIANMEHR, 2017; HORUZ *et al.*, 2017). O uso de pré-tratamentos, como ultrassom, pode gerar um elevado grau de ruptura celular, pela formação de microcanais, influenciando na absorção e retenção de água pelas amostras. Em abóboras, Rojas, Silveira e Augusto (2020) relataram que amostras pré-tratadas com ultrassom obtiveram um aumento na taxa de absorção de água e na capacidade de retenção de água. Resultados semelhantes foram observados em cenouras (RICCE *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2018), morangos (GAMBOA-SANTOS *et al.*, 2014; PROSAPIO; NORTON, 2018) e caquis (BOZKIR *et al.*, 2019).

4 CONCLUSÕES

O uso da técnica de *Dual-stage Sugar Substitution* (D3S) mostrou-se eficiente na incorporação de isomaltulose em fatias de banana verde. A associação de ultrassom em ambos os estágios da técnica promoveu maior perda de água (primeiro estágio) e maior incorporação de soluto (segundo estágio).

As amostras tratadas pela técnica de D3S demandaram maiores tempos de secagem. Dentre os modelos empíricos aplicados no estudo, o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou à cinética de secagem convectiva de fatias de banana tratadas pela técnica de D3S. O modelo difusional de Fick foi satisfatório no ajuste dos dados experimentais, estimando a difusividade efetiva da água transferida durante o processo de secagem. A associação de

ultrassom em ambos os estágios da técnica (D3S 4) resultou em maior valor de difusividade efetiva de água.

A execução da técnica de D3S sem aplicação de ultrassom no estágio final (D3S 3) resultou em amostras secas com maior coeficiente de encolhimento. Comparado com as amostras controle, a aplicação de pré-tratamentos nas fatias de banana resultou no incremento dos parâmetros a^* , b^* , C^* e H° . Melhor capacidade de reidratação foi observada para amostras pré-tratadas pela técnica de D3S sem a aplicação de energia ultrassônica (D3S 1).

A técnica de D3S é viável na produção de um alimento com incorporação de carboidratos com baixo valor glicêmico, como a isomaltulose. A execução do D3S sem ultrassom em todos os estágios da técnica resulta em melhores características físico-químicas no produto final. Estudos posteriores fazem-se necessários para ajuste e adequação de novas condições de processo, como concentração de isomaltulose, tempo de ultrassom e temperatura, visando um produto de maior qualidade.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR-GILANDEH, Y.; KAVEH, M.; JAHANBAKHSI, A. The effect of microwave and convective dryer with ultrasound pre-treatment on drying and quality properties of walnut kernel. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 43, n. 11, p. 1–17, Nov. 2019. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.14178>. Acesso em: 09 jul. 2021.
- ABRAHÃO, F. R.; CORRÊA, J. L. G. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [Philadelphia], p. 1–20, Sept. 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34583597/>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- AHMED, I.; QAZI, I. M.; JAMAL, S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 34, p. 29–43, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856416000072>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- AKHIJAHANI, H. S.; ARABHOSSEINI, A.; KIANMEHR, M. H. Comparative quality assessment of different drying procedures for plum fruits (*Prunus domestica* L.). **Czech Journal of Food Sciences**, [Prague], v. 35, n. 5, p. 449–455, Sept. 2017. Disponível em: Acesso em: 09 jul. 2021.
- AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 59, n. 1, p. 99–104, Aug. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877402004259>. Acesso em: 09 jul. 2021.

AMAMI, E. *et al.* Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 36, p. 286–300, May 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417716304473>. Acesso em: 26 mar. 2022.

ANYASI, T. A.; JIDEANI, A. I. O.; MCHAU, G. R. A. Phenolics and essential mineral profile of organic acid pretreated unripe banana flour. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 104, p. 100–109, Feb. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096399691730649X>. Acesso em: 23 maio 2021.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. 18th ed. Arlington: AOAC, 2010.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 97, n. 2, p. 194–198, Mar. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740900507X>. Acesso em: 29 mar. 2021.

AZOUBEL, P. M. *et al.* Improvement of water transport and carotenoid retention during drying of papaya by applying ultrasonic osmotic pretreatment. **Food Engineering Reviews**, [New York], v. 7, n. 2, p. 185–192, Mar. 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-015-9120-4>. Acesso em: 29 mar. 2021.

BAKALIS, S.; KARATHANOS, V. T. Study of rehydration of osmotically pretreated dried fruit samples. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 23, n. 3, p. 533–549, Mar. 2005. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/drt-200054129>. Acesso em: 09 mar. 2020.

BENSEDDIK, A. *et al.* Empirical and diffusion models of rehydration process of differently dried pumpkin slices. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, [Saudi Arabia], v. 18, n. 4, p. 401–410, Oct. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X17302941>. Acesso em: 09 out. 2021.

BOZKIR, H. *et al.* Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. **Ultrasonics Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 54, p. 135–141, June 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350417718318388>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F. L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 223, p. 152–167, Apr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417305393>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CHAGURI, L. *et al.* Green banana (*Musa cavendishii*) osmotic dehydration by non-caloric solutions: Modeling, physical-chemical properties, color, and texture. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 10, n. 4, p. 615-629, Apr. 2017. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/en/publicacao/129590/green-banana-musa-cavendishii-osmotic-dehydration-by-non-c/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CORRÊA, J. L. G. *et al.* The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe, and overripe bananas. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 8, p. 817–826, May 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2012.667469>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DA SILVA, G. D. *et al.* Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 74, p. 114–119, Dec. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002364381630442X>. Acesso em: 21 out. 2020.

DA SILVA JÚNIOR, E. V. *et al.* Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 97, p. 317–322, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306005>. Acesso em: 21 out. 2020.

DEHGHANNYA, J.; GORBANI, R.; GHANBARZADEH, B. Shrinkage of mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration. **International Journal of Food Properties**, [Philadelphia], v. 19, n. 5, p. 1093–1103, Jan. 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2015.1055362>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DE MEDEIROS, R. A. B. *et al.* Dual-stage sugar substitution in *Tommy Atkins* mango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 1, p. 60–64, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/SmL3QDJLJ7Nt6dZQPtMKH4P/?lang=en>. Acesso em: 12 mar. 2021.

DO CARMO, J. R. *et al.* Properties of Isomaltulose (Palatinose®) – an emerging healthy carbohydrate: Effect of temperature and solute concentration. **Journal of Molecular Liquids**, [Amsterdam], v. 347, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167732221030294>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 26, n. 12, p. 1509–1516, Dec. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930802412256?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 82, n. 2, p. 261–267, Sept. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877407001240>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analyses system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, Nov./Dec. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/yjKLJXN9KysfmX6rvL93TSh>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FIJALKOWSKA, A. *et al.* Ultrasound as a pretreatment method to improve drying kinetics and sensory properties of dried apple. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 39, n. 3, p. 256–265, Apr. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.12217>. Acesso em: 21 out. 2020.

GAMBOA-SANTOS, J. *et al.* Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 161, p. 40–46, Oct. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814614005093>. Acesso em: 29 mar. 2022.

GARCIA-NOGUERA, J. *et al.* Dual-stage sugar substitution in strawberries with a Stevia-based sweetener. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [Oxford], v. 11, n. 1, p. 225–230, Jan. 2010. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/187/>. Acesso em: 21 out. 2020.

GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 76, Mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856422000182>. Acesso em: 29 mar. 2022.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [Pavia], v. 6, n. 3, p. 169–174, 1961. Disponível em: [https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-\(I\)-Temperature-Effect-on-Hendorson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d](https://www.semanticscholar.org/paper/Grain-Drying-Theory-(I)-Temperature-Effect-on-Hendorson/6ef7b1ff7a3e369cc802187641eea87e93dcb82d). Acesso em: 29 mar. 2022.

HORUZ, E. *et al.* Effects of hybrid (microwave-convectonal) and convectonal drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 230, p. 295–305, Sept. 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28407914/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

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**, [Malden], v. 41, n. 6, p. 1–8, Dec. 2017. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.13250>. Acesso em: 29 mar. 2022.

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**, [Amsterdam], v. 82, p. 404–410, Sept. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643817302992>. Acesso em: 29 mar. 2022.

KOWALSKI, S. J.; SZADZIŃSKA, J. Convective-intermittent drying of cherries preceded by ultrasonic assisted osmotic dehydration. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [Lausanne], v. 82, p. 65–70, Aug. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0255270114001196>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Ultrasound pre-treatment prior to unripe banana air-drying: Effect of the ultrasonic volumetric power on the kinetic parameters. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 55, n. 12, p. 5098–5105, Oct. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-018-3450-1>. Acesso em: 29 mar. 2022.

LA FUENTE, C. I. A.; ZABALAGA, R. F.; TADINI, C. C. Combined effects of ultrasound and pulsed-vacuum on air-drying to obtain unripe banana flour. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 44, p. 123–130, Dec. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S146685641630515X>. Acesso em: 21 out. 2020.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solid materials. **Industrial and Engineering Chemistry**, [Washington], v. 13, n. 5, p. 427–432, May 1921. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50137a021>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Convective drying with ethanol pre-treatment of strawberry enriched with isomaltulose. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 14, p. 2046–2061, Sept. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02710-2>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Effect of drying air temperature on drying kinetics and physicochemical characteristics of dried banana. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 43, n. 9, p. 1–10, Sept. 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13451>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MACEDO, L. L. *et al.* Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 155, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821020715>. Acesso em: 29 mar. 2022.

MEDEIROS, R. A. B. de *et al.* Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 67, p. 167–173, Apr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643815303406>. Acesso em: 21 out. 2020.

MIERZWA, D.; KOWALSKI, S. J.; KROEHNKE, J. Hybrid drying of carrot preliminary processed with ultrasonically assisted osmotic dehydration. **Food Technology and Biotechnology**, [Zagreb], v. 55, n. 2, p. 197–205, June 2017. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5569343/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

NOSHAD, M. *et al.* Kinetic modeling of rehydration in air-dried quinces pretreated with osmotic dehydration and ultrasonic. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 36, n. 5, p. 383–392, Oct. 2011. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4549.2011.00593.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.

OLIVEIRA, F. I. P. *et al.* Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 4, p. 610–615, May 2011. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64136/1/2011_art_fipoliveira.pdf. Acesso em: 29 mar. 2022.

OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Production of low calorie Malay apples by dual stage sugar substitution with *Stevia*-based sweetener. **Food and Bioprocess Technology**, [England], v. 90, n. 4, p. 713–718, Oct. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308512000107>. Acesso em: 29 mar. 2022.

OSAE, R. *et al.* Nonthermal pretreatments enhances drying kinetics and quality properties of dried ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) slices. **Journal of Food Process Engineering**, [Malden], v. 42, n. 5, Aug. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpe.13117>. Acesso em: 29 mar. 2022.

OZCAN-SINIR, G. *et al.* The effect of hot air, vacuum and microwave drying on drying characteristics, rehydration capacity, color, total phenolic content and antioxidant capacity of Kumquat (*Citrus japonica*). **Food Science and Technology**, Campinas, v. 39, n. 2, p. 475–484, Apr./June 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/qg6pJT8cxJDNQ987LPyrX7p/?lang=en>. Acesso em: 21 out. 2020.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. 44 p. Master (Science in Mechanical Engineering) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A.-J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 6, p. 36–60, Jan. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0867-9>. Acesso em: 23 jul. 2021.

PEINADO, I. *et al.* Influence of processing on the volatile profile of strawberry spreads made with isomaltulose. **Food Chemistry**, [Oxford], v. 138, n. 1, p. 621–629, May 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23265532/>. Acesso em: 30 ago. 2020.

PROSAPIO, V.; NORTON, I. Simultaneous application of ultrasounds and firming agents to improve the quality properties of osmotic + freeze-dried foods. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 96, p. 402–410, Oct. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818304961>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RICCE, C. *et al.* Ultrasound pre-treatment enhances the carrot drying and rehydration. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 89, p. 701–708, Nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916304215>. Acesso em: 29 mar. 2022.

RODRÍGUEZ, M. M.; RODRIGUEZ, A.; MASCHERONI, R. H. Color, texture, rehydration ability and phenolic compounds of plums partially osmodehydrated and finish-dried by hot air. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 39, n. 6, p. 2647–2662, Dec. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12515>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ROJAS, M. L.; AUGUSTO, P. E. D.; CÁRCEL, J. A. Ethanol pre-treatment to ultrasound-assisted convective drying of apple. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [Oxford], v. 61, May 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856420302745>. Acesso em: 30 set. 2020.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pre-treatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, [England], v. 119, p. 20–30, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960308519305851>. Acesso em: 30 set. 2020.

RUBIO-ARRAEZ, S. *et al.* Modelling osmotic dehydration of lemon slices using new sweeteners. **International Journal of Food Science and Technology**, [Malden], v. 50, n. 9, p. 2046–2051, Sept. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ijfs.12859>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SAWALE, P. D. *et al.* Isomaltulose (Palatinose) – An emerging carbohydrate. **Food Bioscience**, [Amsterdam], v. 18, p. 46–52, June 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212429216301808>. Acesso em: 29 mar. 2022.

SHYAM, S.; RAMADAS, A.; CHANG, S. K. Isomaltulose: Recent evidence for health benefits. **Journal of Functional Foods**, [Amsterdam], v. 48, p. 173–178, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1756464618303372>. Acesso em: 30 jan. 2022.

SILVA JUNIOR, E. V. da *et al.* Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 97, p. 317–322, Nov. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306005>. Acesso em: 29 mar. 2022.

- SOUZA, A. U. de *et al.* Hybrid microwave-hot air drying of the osmotically treated carrots. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 156, Feb. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364382102199X>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- SULISTYAWATI, I. *et al.* Osmotic dehydration of mango: Effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methylesterase and ripeness on quality. **LWT - Food Science and Technology**, [Amsterdam], v. 98, p. 179–186, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643818306844>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- TABTIANG, S.; PRACHAYAWARAKON, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 30, n. 1, p. 20–28, Jan. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.613554>. Acesso em: 30 set. 2020.
- TAIWO, K. A.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Rehydration studies on pretreated and osmotically dehydrated apple slices. **Journal of Food**, [Malden], v. 67, n. 2, p. 842–847, Mar. 2002. Disponível em: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10687.x>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- TAKOUGNADI, E.; BOROZE, T.-E. T.; AZOUMA, O. Y. Effects of drying conditions on energy consumption and the nutritional and organoleptic quality of dried bananas. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 268, p. 1–9, Mar. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877419303917>. Acesso em: 30 set. 2020.
- THIPPANNA, K. S.; TIWARI, R. B. Quality changes in osmotically dehydrated banana var. ‘Robusta’ and ‘Ney Poovan’ as affected by syrup concentration and immersion time. **Journal of Food Science and Technology**, [New Delhi], v. 52, n. 1, p. 399–406, May 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-013-1008-9>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- TÜFEKÇİ, S.; ÖZKAL, S. G. Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre-treatment application. **Heat and Mass Transfer**, [New York], v. 53, p. 2279–2286, Feb. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-017-1983-x>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- UDOMKUN, P.; INNAWONG, B. Effect of pre-treatment processes on physicochemical aspects of vacuum-fried banana chips. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 42, n. 8, p. 1–10, Aug. 2018. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.13687>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- VATANKHAH, H.; RAMASWAMY, H. S. High pressure impregnation (HPI) of apple cubes: Effect of pressure variables and carrier medium. **Food Research International**, [Amsterdam], v. 116, p. 320–328, Feb. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096399691830663X>. Acesso em: 29 mar. 2022.

VERMA, D.; KAUSHIK, N.; RAO, P. S. Application of high hydrostatic pressure as a pretreatment for osmotic dehydration of banana slices (*Musa cavendishii*) finish-dried by dehumidified air drying. **Food and Bioprocess Technology**, [New York], v. 7, p. 1281–1297, May 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-013-1124-6>. Acesso em: 30 set. 2020.

VON LOESECKE, H. W. **Bananas: Chemistry, physiology**. New York: Technology Inter Science, 1950.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying**. ASAE Meeting paper No. 78-6505, St. Joseph, MI, 1978. Disponível em: https://jglobal.jst.go.jp/en/detail?JGLOBAL_ID=201002003579923786. Acesso em: 24 mar. 2020.

WANG, L. *et al.* Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying. **Ultrasonics - Sonochemistry**, [Amsterdam], v. 40, p. 619–628, Jan. 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28946467/>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ZABALAGA, R. F.; CARBALLO, S. C. Convective drying and water adsorption behavior of unripe banana: Mathematical modeling. **Journal of Food Processing and Preservation**, [Malden], v. 39, n. 6, p. 1334–1341, Dec. 2015. Disponível em: <https://ifst.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jfpp.12352>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ZABALAGA, R. F.; LA FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. **Journal of Food Engineering**, [Oxford], v. 187, p. 62–69, Oct. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877416301613>. Acesso em: 30 set. 2020.

ZHANG, L. *et al.* Ultrasound-assisted rehydration of dried Sea Cucumber (*Stichopus japonicus*) – kinetics. **International Journal of Food Engineering**, [Berkeley], v. 12, n. 8, p. 753–761, Sept. 2016. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ijfe-2016-0116/html>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ZHAO, Y.-Y. *et al.* Improving of texture and rehydration properties by ultrasound pretreatment for infrared-dried shiitake mushroom slices. **Drying Technology**, [Philadelphia], v. 37, n. 3, p. 352–362, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2018.1456449?journalCode=ldrt20>. Acesso em: 29 mar. 2022.

CONCLUSÕES GERAIS

Fatias de banana incorporadas de isomaltulose foram obtidas a partir da utilização de diferentes processos e posterior desidratação. Tal produto representa uma alternativa de alimento com relevantes propriedades nutricionais além de estendida vida útil. Sua aplicação é sugerida na formulação de alimentos com baixo teor de açúcar e dietas restritivas. Além do mais, estudos posteriores fazem-se necessários quanto à composição nutricional, qualidade microbiológica e estabilidade dos produtos secos obtidos no presente estudo.

Considerando os processos e técnicas selecionadas no estudo, a aplicação da energia ultrassônica como tratamento prévio à secagem, tanto convectiva quanto por infravermelho, resultou em tempos reduzidos de até 29%, além de proporcionar maiores valores de difusividade efetiva de água e melhoria de algumas propriedades físico-químicas. A imersão das amostras em água previamente à secagem convectiva mostrou-se um eficiente tratamento, reduzindo tempos de secagem, apresentando menor consumo energético, além de proporcionar amostras com melhor capacidade de reidratação. A desidratação osmótica foi relevante na produção de fatias de banana incorporadas de isomaltulose, porém não foi efetiva na redução de tempos e parâmetros de cinética de secagem. Entretanto, o tratamento resultou em cores intensas, melhor aspecto físico e melhor capacidade de reidratação em alguns casos. O uso da técnica de D3S mostrou-se eficiente na incorporação isomaltulose em fatias de banana. A associação de ultrassom em ambos os estágios da técnica promoveu maior perda de água (primeiro estágio) e maior incorporação de soluto (segundo estágio). Entretanto, amostras tratadas pela técnica D3S demandaram maiores tempos de secagem convectiva.

Assim, recomenda-se a técnica de *Dual-Stage Sugar Substitution* (D3S) associada ao ultrassom na produção de bananas incorporadas de isomaltulose. Porém, recomenda-se estudos posteriores para ajuste de novas condições de processo e otimização das condições analisadas. A reutilização da solução osmótica, tanto para novos processos osmóticos quanto para a formulação de outros produtos, também é sugerida.