

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS

Departamento de Engenharia Química

G

E

Q



Trabalho de Conclusão de Curso

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO COM ETANOL
E ULTRASSOM NA CINÉTICA DE SECAGEM DA
BATATA-DOCE**

Carlos Brian Oliveira de Carvalho

Orientadora: Profa. Dra. Patricia Moreira Azoubel

CARLOS BRIAN OLIVEIRA DE CARVALHO

**Influência do pré-tratamento com etanol e ultrassom na cinética de secagem
da batata-doce**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador (a): Patricia Moreira Azoubel

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Carvalho, Carlos Brian Oliveira de.

Influência do pré-tratamento com etanol e ultrassom na cinética de secagem da batata-doce / Carlos Brian Oliveira de Carvalho. - Recife, 2025.
36 p. : il., tab.

Orientador(a): Patricia Moreira Azoubel

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Ipomoea batatas L.. 2. Secagem. 3. Ultrassom . I. Azoubel, Patricia Moreira. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

CARLOS BRIAN OLIVEIRA DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DO PRÉ-TRATAMENTO COM ETANOL E ULTRASSOM NA
CINÉTICA DE SECAGEM DA BATATA-DOCE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Aprovado em: 11/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 PATRICIA MOREIRA AZOUBEL
Data: 13/08/2025 11:36:28-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. Paricia Moreira Azoubel (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 ANTONIO CARLOS DUARTE COELHO
Data: 11/08/2025 09:49:35-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Carlos Duarte Coelho (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 JOAO HENRIQUE FERNANDES DA SILVA
Data: 12/08/2025 20:55:07-0300
verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. João Henrique Fernandes da Silva (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus queridos avós, vô Iz e vó Pame, que sempre fizeram tudo por mim e cujo amor e cuidado permanecem vivos em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, sobre todas as coisas, por iluminar meus caminhos e me dar forças para chegar até aqui.

Aos meus avós, Maria do Carmo Luciano de Oliveira e Luiz Tribertino da Silva, pela educação, pelos valores e pelo amor incondicional que sempre me ofereceram.

Ao meu pai, Carlos Alberto Ferreira de Carvalho, pelas inúmeras vezes em que me apoiou e acreditou em mim, mesmo quando eu duvidava.

À minha mãe, Lucileide Maria de Oliveira Saraiva, por todo o suporte e amparo nas horas em que mais precisei.

Aos meus irmãos, Carlos Gabriel, Carla Carrolliny, Gabryella Victória em especial à Hemily Beatriz, que tantas vezes me incentivou a não desistir dos meus sonhos.

À toda minha família, que sempre me incentivou e investiu em minha educação.

Aos amigos que construí ao longo da jornada universitária, em especial Anna, Carinne, Eunice, Julia, Larissa, Lindsay, Luiz e Rhyanne pela amizade sincera, e aos amigos que construí durante estágios, empresa junior e PIBIC, em especial Gabryella, Jacqueline e Zilmar, pela amizade e aprendizado.

À professora Patrícia Moreira Azoubel, por todos os ensinamentos, orientação e paciência ao longo deste percurso.

À Universidade Federal de Pernambuco e ao Departamento de Engenharia Química, por todas as experiências vividas, pelas emoções e pelo aprendizado que vai muito além da teoria.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta etapa da minha vida fosse possível, meu sincero muito obrigado.

“A persistência é o caminho do êxito”.
(Charles Chaplin)

RESUMO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* L.), tubérculo amplamente cultivado e consumido no Brasil, apresenta elevado teor de umidade que favorece sua rápida deterioração. A secagem surge como alternativa eficaz para prolongar a vida útil e facilitar o armazenamento do produto. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de pré-tratamentos na cinética de secagem da batata-doce. Para o pré-tratamento, as amostras foram imersas em soluções de etanol (25%), com e sem aplicação do ultrassom (25 kHz) por 10 min. A secagem foi realizada em secador de bandejas convectivo a $2 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ e a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Para o estudo da cinética, empregaram-se o modelo difusional e os modelos empíricos de Page, logarítmico, exponencial dois termos, exponencial simples e o de Midilli. Este último apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. O maior valor da difusividade efetiva obtido foi de $8,18 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$ para a batata-doce pré-tratada com ultrassom e etanol, evidenciando maior eficiência na remoção de água, reduzindo-se aproximadamente 23,48% no tempo de secagem. Esses resultados destacam a importância de técnicas combinadas para otimizar processos de conservação do tubérculo, contribuindo para o desenvolvimento de métodos mais eficientes e sustentáveis na cadeia de armazenamento e processamento de alimentos.

Palavras-chave: *Ipomoea batatas* L., secagem, ultrassom.

ABSTRACT

Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.), a tuber widely cultivated and consumed in Brazil, has a high moisture content which favors rapid deterioration. Drying emerges as an effective alternative to extend its shelf life and facilitate storage. This study aimed to evaluate the influence of different pre-treatments on the drying kinetics of sweet potato. For the pre-treatment, samples were immersed in ethanol solution (25%), with and without ultrasound (25 kHz) for 10 min. Drying was carried out in a convective tray dryer at $2 \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$ and $60 \text{ }^\circ\text{C}$. The diffusion model and the empirical models of Page, logarithmic, exponential two-term, simple exponential, and Midilli were used to study the kinetics. The latter presented the best fit to the experimental data. The highest effective diffusivity value obtained was $8.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$ for sweet potato pre-treated with ultrasound and ethanol, demonstrating greater efficiency in water removal, with a reduction of approximately 23,48% in drying time. These results highlight the importance of combined techniques to optimize tuber conservation processes, contributing to the development of more efficient and sustainable methods in the food storage and processing chain.

Keywords: *Ipomoea batatas* L., drying, ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Planta da batata-doce	17
Figura 2.	Banho ultrassônico utilizado na etapa de pré-tratamento	22
Figura 3.	Secador convectivo de leito fixo	22
Figura 4.	Amostras secas sem pré-tratamento (Natura), e com pré-tratamentos Etanol25% e USEtanol25%	36
Figura 5.	Variação da ADM com relação ao tempo	25
Figura 6.	Variação da taxa de secagem	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Modelos matemáticos	23
Tabela 2.	Parâmetros para os modelos matemáticos	27
Tabela 3.	Tempo de secagem para atingir a legislação	29
Tabela 4.	Difusividades Efetivas	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADM	Adimensional da umidade
ANVISA	Agência nacional de vigilância sanitária
AOAC	Association of official analytical collaboration
EMBRAPA	Empresa brasileira de pesquisa agropecuária
FoRC	Food Research Center
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
PE	Pernambuco
RDC	Resolução da diretoria colegiada
RMR	Região metropolitana do grande Recife
TBCA	Tabela brasileira de composição de alimentos

LISTA DE SÍMBOLOS

Etanol25%	Solução de Etanol a 25%
K, v, a, b, c, k_0, k_1	Constantes dos modelos matemáticos
M_0	Massa inicial do produto (g)
M_e	Valores obtidos experimentalmente
M_p	Valores preditos pelo modelo
N	Número de pontos experimentais
P	Erro relativo médio
R^2	Coefficiente de determinação
t	Tempo de secagem
USEtanol25%	Solução de Etanol a 25% com banho ultrassônico
X_{bs}	Ganho de sólidos ($\text{kg água} \times \text{kg}^{-1}$ massa seca)
X_{bu}	Base úmida ($\text{kg água} \times \text{kg}^{-1}$ massa da amostra)
X_0	Umidade inicial da amostra ($\text{kg água} \times \text{kg}^{-1}$ massa seca)
X_e	Umidade de equilíbrio ($\text{kg água} \times \text{kg}^{-1}$ massa seca)
X_t	Umidade média no tempo t ($\text{kg água} \times \text{kg}^{-1}$ massa seca)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJEITVO GERAL	16
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	BATATA-DOCE	17
3.2	SECAGEM	18
3.2.1	Pré-tratamento com Etanol	19
3.2.2	Pré-tratamento com Ultrassom	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1	MATÉRIA PRIMA	21
4.2	PRÉ-TRATAMENTO E SECAGEM	21
4.2.1	Pré-tratamento	21
4.2.2	Secagem	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1	SECAGEM	25
5.1.1	Modelagem Cinética de secagem	27
5.1.2	Aplicação de pré-tratamentos, Avaliação da taxa de secagem e Modelos testados	28
5.1.3	Tempo de Secagem	29
5.2.4	Difusividade Efetiva	29
6	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32
	APÊNDICE A	36

1 INTRODUÇÃO

A batata-doce (*Ipomoea batatas* L.), também conhecida pelos nomes de batata-da-terra, batata-da-ilha, jatica e jetica, é muito mais do que um alimento saboroso e nutritivo, representando uma verdadeira força na agricultura, com um papel de destaque na economia e na sociedade. Existem diferentes variedades desse tubérculo, que são classificadas com base no formato, tamanho, cor, grau de precocidade, além da cor das folhas e flores (Basilio et al., 2022).

Essa hortaliça versátil pode ser cultivada tanto em pequenas hortas quanto em grandes plantações, demonstrando sua elevada capacidade produtiva e sua importância para diversos setores. No Brasil, e em outros países, a batata-doce é amplamente consumida por sua facilidade de aquisição e pelos benefícios que oferece à saúde humana, sendo uma fonte rica de nutrientes essenciais. Além de seu uso na alimentação humana, também desempenha um papel importante na alimentação animal e na indústria, contribuindo na fabricação de alimentos, fármacos, tecidos, papel, cosméticos e até na produção de combustíveis (Kurnianingsih et al., 2020). Entretanto, apesar de seu grande potencial funcional, o armazenamento e a preservação da batata-doce apresentam desafios significativos devido ao seu alto teor de umidade. Essa característica a torna altamente suscetível ao escurecimento oxidativo, à degradação de compostos bioativos e à rápida deterioração, aumentando sua vulnerabilidade a ataques microbianos e reduzindo sua vida útil (Silva et al., 2025; Monteiro et al., 2020).

Nas últimas décadas, o processo convencional de secagem tem ganho destaque especial no setor de alimentos, principalmente na conservação de vegetais. Essa técnica consiste na remoção de grande parte da água livre presente nos alimentos, o que é fundamental para inibir o crescimento de microrganismos e retardar reações bioquímicas que poderiam levar à deterioração. Como consequência, os produtos desidratados têm uma vida útil mais longa, o que simplifica consideravelmente o transporte e o armazenamento, além de diminuir os gastos com logística e estoque (Jiang et al., 2025, Zhao et al., 2023). Entretanto, o uso de altas temperaturas pode resultar em perdas de nutrientes importantes, tais como vitaminas hidrossolúveis. Além disso, a textura dos vegetais é afetada, muitas vezes tornando-se mais dura, quebradiça ou menos agradável ao paladar. Outro aspecto negativo é a alteração de características sensoriais dos alimentos. A cor pode ter perda de

intensidade, enquanto o odor e o sabor natural dos vegetais podem ser comprometidos (Dolas, Saravanan e Kaur, 2019).

Diferentes alternativas estão sendo investigadas para melhorar a secagem dos alimentos, incluindo o uso de pré-tratamentos, como a imersão em etanol (Rojas, Augusto e Cácel, 2020) e o uso do ultrassom (Dolas Saravanan e Kaur, 2019). O ultrassom é uma tecnologia emergente que, devido a mecanismos como cavitação, efeito esponja, microjatos e outros, que podem modificar a estrutura dos produtos e melhorar a transferência de calor e massa durante o processamento dos alimentos. Já o etanol, devido a diferenças de tensão superficial entre ele e a água, há saída de água e a entrada de etanol no produto (Guedes et al., 2021). Além do efeito osmótico e da maior pressão de vapor, que, após o pré-tratamento, aceleram o processo de secagem (Silveira et al., 2024).

Diante do exposto, o uso combinado dos pré-tratamentos de ultrassom com o etanol pode ser uma alternativa para redução do tempo de secagem devido à união das características individuais dos pré-tratamentos e mostrando que o uso do ultrassom pode potencializar a ação do etanol na amostra.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da utilização do pré-tratamento de etanol, combinado ou não com o uso do ultrassom, na secagem da batata-doce (*Ipomea batatas* L.).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Calcular a difusividade efetiva;

Calcular o tempo de secagem;

Utilizar modelos empíricos para avaliar a cinética de secagem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.2 BATATA-DOCE

A batata-doce, cientificamente conhecida como *Ipomoea batatas* (Lam.), é uma planta dicotiledônea da família Convolvulaceae, reconhecida como uma raiz tuberosa (**Figura 1**), crucial para a segurança alimentar (Etana, Gonfa e Dureza, 2019). Destaca-se como uma das raízes mais importantes e nutritivas, rica em carboidratos e amido, com alto teor energético, fibra alimentar e potássio, além de servir como fonte de antocianinas, compostos fenólicos, saponinas, glicosídeos, alcaloides, esteroides, taninos, ácido fítico, oxalatos, antraquinonas e outros componentes bioativos funcionais (Hossain et al., 2022).

Figura 1. Planta da batata-doce



Fonte: Lima, Ferreira e Sánchez. (2023)

A cultura é caracterizada por baixos custos de produção, pois dispensa, em muitos casos, o uso intensivo de fertilizantes, defensivos agrícolas e irrigação, tornando-se uma alternativa viável para pequenos e médios produtores rurais (EMBRAPA, 2025). A produção de batata-doce no Brasil tem apresentado crescimento nos últimos anos, com destaque para o aumento da área colhida e da quantidade produzida. Em 2023, foram produzidas 925 mil toneladas em 61 mil hectares gerando mais de R\$ 1,7 bilhões em valor de produção (IBGE, 2023).

A batata-doce é um alimento que está entre as principais fontes de carboidratos complexos e de baixa caloria da dieta do brasileiro (EMBRAPA, 2025). É um alimento nutritivo, contendo 63 a 83% de umidade (Shee et al., 2019), sendo muito suscetível à deterioração microbiana, o que reduz sua vida útil, levando a perdas pós-colheita significativas (Islam, 2024). Além disso, devido a técnicas inadequadas de colheita, pós-colheita e armazenamento, os vegetais têm vida útil curta, levando a perdas de 30 a 40% em países em desenvolvimento (Rajapaksha, Gunathilake e Pathirana, 2021). A desidratação é um método de preservação que pode reduzir perdas, aumentar a disponibilidade e agregar valor a esses alimentos essenciais (Monteiro et al., 2022).

3.2 SECAGEM

Muitos métodos de secagem são adequados para frutas e hortaliças. A secagem com ar quente é o método mais antigo e utilizado. No entanto, esse processo convectivo de transferência de calor e massa apresenta baixa eficiência energética e longo tempo de secagem, promovendo alteração significativa da cor, degradação de nutrientes, encolhimento do material e redução da capacidade de reidratação (Xu et al., 2021).

Entre as estratégias mais utilizadas para prolongar a vida útil de produtos agrícolas está a redução da atividade de água (a_w), uma das principais responsáveis pela proliferação de microrganismos e pela aceleração de reações químicas que levam à deterioração dos alimentos. A secagem, nesse contexto, destaca-se como uma das técnicas mais empregadas. O processo de secagem consiste na remoção

da água presente nos alimentos, promovendo sua transferência da fase líquida para a fase gasosa, por meio de mecanismos de vaporização térmica, como na secagem por ar quente, ou por sublimação, como ocorre na liofilização (Rana et al., 2024).

A transferência de massa (água) no tecido vegetal depende da difusividade do material que, por sua vez, é limitada pela permeabilidade da parede celular. A difusividade pode ser elevada através do aumento da temperatura, aumento da superfície de contato do alimento e através de tratamentos enzimáticos (Silveira 2023). Entretanto, a secagem convencional apresenta algumas limitações, como alto consumo energético, longo tempo de processo e degradação de compostos bioativos e sensoriais importantes, como vitaminas, corantes naturais e compostos aromáticos. Em função desses desafios, a indústria de alimentos e a comunidade científica têm investido no desenvolvimento de pré-tratamentos que visam otimizar o processo de secagem, reduzindo o tempo necessário e minimizando as perdas nutricionais e sensoriais (Salehi, 2023).

3.2.1 Pré-tratamento com Etanol

O uso de etanol como agente auxiliar no processo de secagem é uma alternativa tecnológica que vem sendo amplamente estudada. Quando aplicado sobre a superfície do alimento, o etanol atua reduzindo a tensão superficial da água, promovendo maior taxa de evaporação e diminuindo o tempo de secagem. Além disso, o etanol forma uma camada protetora na superfície dos alimentos, reduzindo as perdas de compostos voláteis responsáveis pelo aroma e sabor. Essa abordagem mostrou-se eficiente na retenção de compostos como álcoois, aldeídos, ésteres, ácidos e fenóis, conferindo melhor qualidade sensorial ao produto final. Ainda, não é prejudicial aos seres humanos e não foram relatados resíduos de etanol em materiais secos (Freitas et al. 2021).

O etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) é um composto orgânico, completamente miscível em água, apresentando maior volatilidade, e apresenta bom desempenho na remoção de umidade (Silveira et al., 2023). Do ponto de vista da qualidade nutricional, o uso dos métodos modernos de pré-tratamento da secagem para a conservação tem

mostrado impactos positivos. O uso de atmosferas modificadas com etanol, por exemplo, reduz o tempo de secagem significativamente em alimentos ricos em amido, como a batata (Guedes et al. 2021).

3.2.2 Pré-tratamento com Ultrassom

O ultrassom, quando aplicado ao alimento, provoca rápidas e sucessivas compressões e expansões no tecido vegetal, gerando o chamado "efeito esponja". Esse fenômeno cria microcanais dentro da estrutura do alimento, facilitando a migração da água para a superfície e, conseqüentemente, acelerando o processo de secagem. Além disso, o efeito de cavitação, gerado pela implosão de microbolhas dentro do meio líquido, contribui para a ruptura das paredes celulares, promovendo uma maior eficiência na remoção da água. A aplicação de ultrassom antes da secagem por ar quente ou infravermelho reduziu significativamente o tempo total de secagem, ao mesmo tempo em que preservou melhor os carotenoides e compostos antioxidantes da batata-doce (Rashid et al., 2022). Observaram aumento na porosidade dos tecidos, menor tempo de secagem e menor degradação de carotenoides quando o processo foi realizado em temperaturas entre 50 e 70 °C, mostrando que sua aplicação, especialmente em potências acima de 300 W e por períodos de 15 a 30 minutos. Como resultados, há menor dureza, melhor preservação da cor e maior teor de compostos fenólicos em vegetais e frutas, incluindo a batata-doce (Yang et al., 2021).

Pesquisas recentes realizadas com a abóbora, por exemplo, evidenciaram que a combinação de imersão em etanol com aplicação de ultrassom melhorou significativamente a cinética de secagem e a qualidade final do produto (Rojas, Silveira e Augusto, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATÉRIA-PRIMA

Foram utilizadas batata-doce (*Ipomoea batatas* L.), adquiridas no mercado local (RMR, PE). As batatas-doces foram lavadas, descascadas e cortadas em fatias de 5 mm de espessura, utilizando uma faca de aço inoxidável e um cortador de 30 mm × 50 mm.

4.2 PRÉ-TRATAMENTO E SECAGEM

4.2.1 Pré-tratamento

Para o pré-tratamento, 3 fatias de batata-doce foram colocadas em um béquer de 250 mL e imersas em solução etanólica (25%), sendo utilizada uma razão de 1:4 (referente ao peso da amostra e o peso da solução, respectivamente), durante 10 minutos. Para as amostras submetidas ao ultrassom, o béquer contendo as 3 fatias de batata-doce imersas em soluções de etanol (25%) foi colocado no banho ultrassônico (UNIQUE, Modelo USC-1850A) de 25 kHz, como mostrado na **Figura 2**, durante 10 minutos

Figura 2. Banho ultrassônico utilizado na etapa de pré-tratamento



Fonte: O autor (2025)

4.2.2 Secagem

A secagem foi realizada em um secador de leito fixo (secador de bandejas, **Figura 3**), de aço inoxidável, na temperatura de 60 °C e velocidade do ar de secagem de $2 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$. A secagem foi feita utilizando 6 fatias de batata-doce, colocadas em uma bandeja perfurada. A pesagem das amostras foi realizada em uma balança semianalítica, em intervalos de tempo de 15 em 15 minutos até que o equilíbrio dinâmico entre a amostra e o ar de secagem fosse alcançado.

Figura 3. - Secador convectivo de leito fixo



Fonte: O autor (2025)

Os modelos apresentados na **Tabela 1** foram utilizados para ajuste aos dados experimentais obtidos.

Tabela 1. Modelos Matemáticos

Modelo	Equação	Referências
Exponencial simples	$ADM = \exp(-kt)$	Abe e Afzal (1997)
Page	$ADM = \exp(-kt^n)$	Karathanos e Belessiotis (1999)
Logaritmo	$ADM = a \exp(-kt) + c$	Yaldiz, Ertekin e Uzun (2001)
Exponencial dois termos	$ADM = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Ozdemir e Devres (1999)
Midilli	$ADM = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. (2002)

Fonte O: autor (2025)

A razão de umidade (ADM) é dada pela equação (1).

$$ADM = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (1)$$

Sendo: X o teor de umidade médio no tempo t (kg de água × kg⁻¹ de massa seca); X_e é o teor de umidade de equilíbrio (kg de água × kg⁻¹ de massa seca); X_o é o teor de umidade inicial (kg de água × kg⁻¹ de massa seca).

Para verificar o ajuste dos modelos aos dados experimentais, foi calculado o erro relativo médio (P) pela equação 2, sendo considerado preditivo quando valores de P menores que 10% (Lomauro, Bakashi e Labuza, 1985).

$$P = \frac{100}{N} \cdot \sum_N \frac{|(m_e - m_p)|}{m_e} \quad (2)$$

Sendo: m_p os valores teóricos encontrados pelo modelo matemático; m_e são os valores encontrados experimentalmente e N é a quantidade de pontos do experimento.

A difusividade efetiva foi calculada utilizando a equação (3), onde é considerada a solução de Crank (1975) para a geometria de placa plana infinita.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[-(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4l^2} \right] \quad (3)$$

Sendo: t o tempo (s), i é o número de termos da série, D_{ef} é a difusividade efetiva da água ($m^2 \times s^{-1}$), L é a meia espessura da amostra de alimento (m).

A determinação do teor de umidade das amostras foi realizada através de secagem por estufa, em triplicata, de acordo com a metodologia da AOAC (2002).

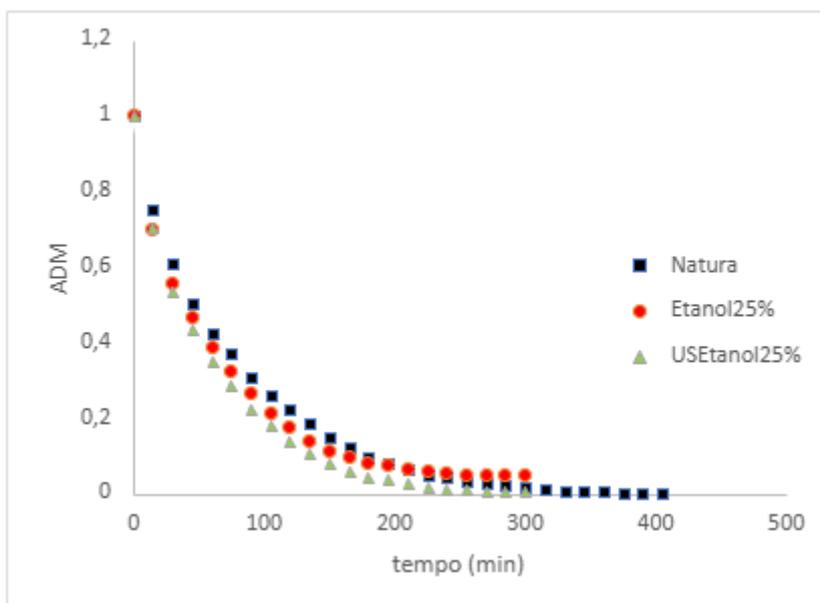
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SECAGEM

As batatas-doces utilizadas nos experimentos apresentaram um teor inicial de umidade de $64,50 \text{ g água} \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$ amostra (base úmida, X_{bu}) ou $1,82 \text{ kg água/kg}$ massa seca (base seca, X_{bs}). Os resultados mostraram um alto teor de umidade, valor similar ao fornecido pela TBCA (FoRC; USP, 2024), de $67,1 \text{ g de água} \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$ do tubérculo. Para uma visualização do produto seco foi adicionada a **Figura 4** no Apêndice A.

O estudo da cinética de secagem e sua modelagem matemática são essenciais para simplificar, compreender, prever e otimizar o processo (Rana et al. 2024). Na **Figura 5**, estão representadas as curvas cinéticas de secagem da batata-doce para os ensaios realizados.

Figura 5. Variação da ADM com relação ao tempo

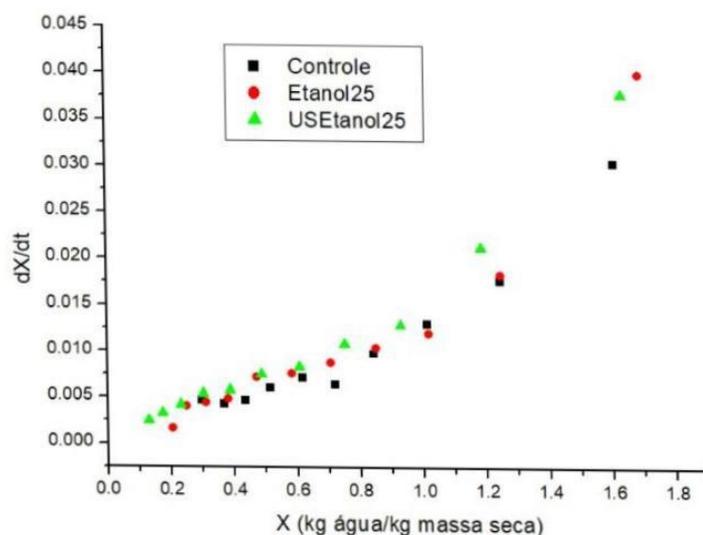


Fonte: O autor (2025)

As batatas-doces que passaram pelo pré-tratamento com etanol atingiram a condição de equilíbrio mais rapidamente do que as amostras sem pré-tratamento. As amostras pré-tratadas em etanol e ultrassom apresentaram menores teores de umidade, quando comparadas com as demais amostras.

A secagem sem pré-tratamento apresentou uma taxa de secagem inferior às secagens da batata-doce com pré-tratamento (**Figura 6**). Esse comportamento pode ser explicado pelo efeito Marangoni, que ocorre devido ao gradiente de tensão superficial formado entre o etanol residual na superfície das amostras e a água presente no material. Esse gradiente induz um fluxo de água do núcleo da amostra para a superfície, facilitando sua evaporação e acelerando o processo de secagem.

Figura 6. Variação da taxa de secagem



Fonte: O autor (2025)

Silva et al. (2025), em estudos sobre a influência do etanol na secagem da batata-doce roxa, também observaram menor tempo de secagem no tubérculo pré-tratado. Rojas, Silveira e Augusto (2020), durante a secagem de abóbora pré-tratada com etanol e ultrassom, relataram que o acréscimo do ultrassom aumentou a taxa de secagem. Isso ocorre porque o ultrassom, quando aplicado ao alimento, provoca rápidas e sucessivas compressões e expansões no tecido vegetal, gerando o efeito da cavitação. Esse fenômeno cria microcanais na estrutura do alimento, facilitando a

migração da água para a superfície e, conseqüentemente, acelerando o processo de secagem.

5.1.1 Modelagem da Cinética de Secagem

Os parâmetros dos modelos, valores de coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio relativo (P), estão expostos na **Tabela 2**.

Tabela 2. Parâmetros para os modelos matemáticos de secagem nas diferentes condições

Modelo	Amostra	R^2	P (%)	k	n	a	b	c
Page	Natura	0,9962	58,77	6,36E-04	8,81E-01	—	—	—
	Etanol 25%	0,9961	9,52	1,53E-03	7,90E-01	—	—	—
	US Etanol 25%	0,9963	37,25	8,19E-04	8,79E-01	—	—	—
Logarítmico	Natura	0,9784	232,61	—	—	-2,42E-01	—	2,39E+00
	Etanol 25%	0,9772	28,06	—	—	-2,35E-01	—	2,29E+00
	US Etanol 25%	0,9786	137,77	—	—	-2,45E-01	—	2,35E+00
Exponencial Dois Termos	Natura	0,9893	50,79	2,32E-04	—	7,28E-03	—	—
	Etanol 25%	0,9846	8,14	2,99E-04	—	4,77E-02	—	—
	US Etanol 25%	0,9889	33,92	3,04E-04	—	9,36E-03	—	—
Exponencial Simples	Natura	0,9888	15,82	2,27E-04	—	—	—	—
	Etanol 25%	0,9650	29,10	2,57E-04	—	—	—	—
	US Etanol 25%	0,9881	10,55	2,96E-04	—	—	—	—
Midilli	Natura	0,9989	24,45	2,64E-04	9,68E-01	8,98E-01	-5,16E-07	—
	Etanol 25%	0,9993	1,78	1,04E-04	1,09E+00	8,16E-01	1,95E-06	—
	US Etanol 25%	0,9991	13,32	2,57E-04	9,99E-01	8,74E-01	-5,15E-07	—

Fonte: O Autor (2025)

Para a secagem com o pré-tratamento em etanol a 25%, o modelo de Midilli foi o que mais se adequou. O valor do coeficiente de determinação foi o que mais se aproximou de 1. Além disso, o erro médio relativo desse modelo na secagem nessas condições de pré-tratamento foi de, 1,78%, sendo o menor dos erros encontrados. Observou-se também um bom ajuste aos dados experimentais do modelo de Midilli para as demais secagens, encontrando valores do coeficiente de determinação bastante próximos a 1 para as amostras sem e com pré-tratamento de etanol a 25% e ultrassom, de respectivamente, 0,9989 e 0,9991.

Silva et al. (2025) também utilizou o modelo de Midilli para ajustes na secagem da batata-doce. Esse modelo também foi citado por Rashid et al. (2022), como um bom modelo para prever dados de secagem de batata-doce e por Geraldi (2018) como o mais adequado para secagem de fécula de batata-doce.

5.1.2 Aplicação de pré-tratamentos, Avaliação da taxa de secagem e Modelos testados

A avaliação da taxa de secagem indicou que os pré-tratamentos aceleraram a remoção de água, sendo mais expressivo no caso da combinação etanol com ultrassom. Essa condição apresentou menores valores de umidade ao longo de todo o processo e a mais elevada difusividade efetiva.

Dentre os modelos testados, o de Midilli apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais para todas as condições avaliadas, com coeficientes de determinação (R^2) próximos de 1 e menores valores de erro médio relativo (P), reforçando sua adequação para representar a secagem de batata-doce nas condições estudadas.

O uso de pré-tratamentos, especialmente a associação entre etanol e ultrassom, pode ser uma estratégia eficaz para otimizar o processo de secagem da batata-doce, reduzindo o tempo de processamento e acelerando a remoção de água, sem comprometer o atendimento aos parâmetros legais de umidade. Esses resultados reforçam o potencial de aplicação industrial dessa abordagem, podendo contribuir para maior economia energética, gerando um aumento da viabilidade econômica do processo.

5.1.3 Tempo de Secagem

A ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária) determina, através da Resolução RDC N° 272 de 22 de setembro de 2005, que o teor máximo de umidade permitido para vegetais secos equivale ao valor de 12%. Dessa forma, identificou-se o tempo necessário para atingir 10% de teor de umidade em cada uma das secagens realizadas. O resultado está disposto na **Tabela 3**.

Tabela 3. Tempo de secagem para atingir a legislação

Secagem	Tempo (min)
Natura	182,08
Etanol25%	165,19
USEtanol25%	139,32

Fonte: O autor (2025)

Observou-se que as amostras submetidas ao pré-tratamento com etanol a 25% sem e com ultrassom atingiram o teor de umidade de 10% em tempo menor do que a amostra in natura. Com o pré-tratamento com etanol, a secagem resultou em uma redução no tempo em 9,28%, enquanto que para a amostra pré-tratada com etanol e ultrassom, a redução do tempo de secagem foi de 23,48%. Dessa forma, o uso de combinações de pré-tratamentos favoreceu a diminuição do tempo de secagem.

5.1.4 Difusividade Efetiva

Os valores das difusividade efetiva obtidos estão apresentadas na **Tabela 4**.

Tabela 4. Difusividades Efetivas

Amostras	$D_{ef} \times 10^{-10} \text{ (m}^2 \times \text{s}^{-1}\text{)}$
Natura	6,71
Etanol25%	7,52
USEtanol25%	8,18

Fonte: O autor (2025)

Na secagem em batata-doce, Rana et al. (2024) obtiveram resultados com ordem de grandeza similar ao desse estudo, sendo a difusividade efetiva equivalente a $1,18 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$, entretanto utilizando uma temperatura de secagem de 45 °C. Já na secagem convectiva de batata-doce a 60 °C, Silva et al. (2025) obtiveram valor de difusividade $2,68 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$, para o vegetal *in natura*, e de $3,68 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$, para amostras tratadas com etanol 96%.

Vale salientar que a comparação desses valores é muito difícil, pelo fato das diferentes condições experimentais e métodos de secagem utilizados, além dos distintos tipos ou cultivares de batata-doce empregados em cada um desses experimentos.

6 CONCLUSÃO

A influência da utilização do pré-tratamento de etanol, combinado ou não com o uso do ultrassom, na secagem da batata-doce (*Ipomea batatas* L.), foi avaliada com o estudo da cinética de secagem da batata-doce que foi realizado com e sem pré-tratamento, com uso de modelos empíricos. O cálculo da difusividade efetiva e o do tempo de secagem, também foram realizados e o uso de pré-tratamento se mostrou vantajoso devido a redução do tempo de secagem quando comparada ao tubérculo sem o uso de pré-tratamento e o aumento da sua difusividade efetiva.

Recomenda-se que para trabalhos futuros a adição de análises de parâmetros de qualidade seja realizada, para uma avaliação mais ampla da influência dos pré-tratamentos.

REFERÊNCIAS

ABE, T.; AFZAL, T. M.. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Japan, v. 67, p. 289-297, 1997.

Association of Official Analytical Chemistry (AOAC). Official methods of analysis of the AOAC. 17 ed. Washington: AOAC, 2002. 1115p.

BASÍLIO, L. S. P.; PRADO, R. S.; PEREIRA, R. M.; SANTOS, G. F.; PEREIRA, R. G. L.; LUZ, J. M. R. New beverage based on grapes and purple-fleshed sweet potatoes: Use of non-standard tubers. **Food Bioscience**, v. 47, p. 101626, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101626>.

BRASIL. Resolução RDC nº 272 de 22 de setembro de 2005. Aprova o regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, 2005.

CRANK, J. Mathematics of diffusion. 2ed. **Oxford: Clarendon Press**, 1975. 414p.

DOLAS, R., SARAVANAN, C., & KAUR, B. P. (2019). Emergence and era of ultrasonic's in fruit juice preservation: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, 58, 104609. PMID:31450377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.026>

EMBRAPA. **Batatas-Doce recomendadas – Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2025. Folder.

ETANA, M. B.; GONFA, M. T.; DURESA, C. O. Production constraints of sweet potato (*Ipomea batatas* L.): a review. **International Journal of Agriculture & Agrobusiness**, v.5, 37-46, 2019.

FOOD RESEARCH CENTER – FoRC; Universidade de São Paulo (USP). **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA-USP)**, versão 7.2. São Paulo: FoRC/FCF-USP; 2024.

FREITAS, L. D. C.; BRANDÃO, S. C. R.; FERNANDES DA SILVA, J. H.; SÁ DA ROCHA, O. R.; AZOUBEL, P. M. Effect of Ethanol and Ultrasound Pretreatments on Pineapple Convective Drying. **Food Technology and Biotechnology**, v. 59, n. 2, p. 209-215, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17113/ftb.59.02.21.7045>.

GERALDI, C. Extração e estudo da cinética de secagem da fécula de batata-doce. **Natural Resources**. <https://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2018.001.0001>

GUEDES, J. S., SANTOS, K. C., CASTANHA, N., ROJAS, M. L., MATTA JUNIOR, M. D., LIMA, D. C., & AUGUSTO, P. E. D. (2021). Structural modification on potato tissue and starch using ethanol pretreatment and drying process. **Food Structure**, 29, Article 100202. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100202>

HOSSAIN, M.M., RAHIM, M.A., MOUTOSI, H.N., DAS, L.. Evaluation of the growth, storage root yield, proximate composition, and mineral content of colored sweet potato genotypes. **J. Agric. Food Res.** 8, 100289, 2022

ISLAM, S. (2024). Batata-doce [Ipomoea batatas (L.) lam]: o superalimento do próximo século? Uma revisão intensiva sobre seu potencial como fonte alimentar sustentável e versátil para as gerações futuras. *CyTA – Journal of Food* , 22 (1). <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2397553>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). IBGE Cidades – Pesquisa Produção Agrícola: Brasil. 2023.

JIANG, D.-L.; SHIRKOLE, S. S.; JU, H.-Y.; NIU, X.-X.; XIE, Y.-K.; LI, X.-Y.; LIN, Z.-F.; ZHENG, Z.-A.; XIAO, H.-W. Na improved infrared combined hot air dryer design and effective drying strategy analysis for sweet potato. **LWT**, v.215, 117204, 2025.

KARATHANOS, V. T.; BELESSIOTIS, V. G. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 74, p. 355-361, 1999.

KURNIANINGSIH, N.; JANTARAWIMON, N.; SUPRAPTO, T.; YULIANTI. The Behavioral Effect of Anthocyanin from Purple Sweet Potatoes on Prenatally Stressed Offspring Mice. **Systematic Reviews in Pharmacy**, v. 11, n. 10, p. 482–490, 2020.

LIMA, M. A. A., FERREIRA, M. E., SÁNCHEZ, C., (2023) Batata-doce, Ver. **Ciência Elem.**, V11(2):018
DOI <http://doi.org/10.24927/rce2023.018>

LOMAURO C.J., BAKSHI A.S., LABUZA T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologies**, v.18, p.112-122, 1985.

MACEDO, L. L., CORRÊA, J. L. G., DA SILVA ARAÚJO, C., & CARDOSO, W. S. (2023). Use of ethanol to improve convective drying and quality preservation of fresh and sucrose and coconut sugar-impregnated strawberries. **Food Bioprocess Technology**. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03066-5>

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002. DOI: 10.1081/DRT-120005864

MONTEIRO, R. L.; MORAES, J. O. DE; GOMIDE, A. I.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Temperature control for high-quality oil-free sweet potato CHIPS produced by microwave rotary drying under vacuum. **LWT**, v.157, 113047, 2022.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225-233, 1999.

RANA, ABHISHEK; DHIMAN, ATUL; KUMAR, SATISH; SUHAG, RAJAT; SAINI, RAJNI. Osmosonicação para desidratação de frutas e vegetais: compreensão mecanicista, modelos matemáticos e aplicações abrangentes no processamento.

Trends in Food Science & Technology, [S. l.], v. 146, p. 104688, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104688>.

RAJAPAKSHA, L., GUNATHILAKE, D., & PATHIRANA, S. M. (2021). Reducing post-harvest losses in fruits and vegetables for ensuring food security–Case of Sri Lanka. **MOJ Food Process Technols**, 9(1), 7–16.

RASHID, M. T., LIU, K., JATOI, M. A., SAFDAR, B., LV, D., & LI, Q. (2022). Energy efficient drying technologies for sweet potatoes: Operating and drying mechanism, quality-related attributes. **Frontiers in nutrition**, 9, 1040314. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040314>

RASHID, R. N.; KOTWALIWALE, N.; JAIN, D.; PANDIT, A. B. Ultrasound pretreatment for food drying processes: A comprehensive review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 86, p. 106021, 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**, v. 61, n. November 2019, p. 102328, 2020.

ROJAS, M. L.; SILVEIRA, I.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound and ethanol pretreatments to improve convective drying: Drying, rehydration and carotenoid content 93 of pumpkin. **Food and Bioproducts Processing**, v. 119, p. 20–30, 2020.

SALEHI, FAKHREDDIN. Recent advances in the ultrasound-assisted osmotic dehydration of agricultural products: A review. **Food Bioscience**, [S. l.], v. 48, p. 102307, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102307>.

SHEE, A., MAYANJA, S., SIMBA, E., STATHERS, T., BECHOFF, A., BENNETT, B. (2019). Determinants of postharvest losses along smallholder producers maize and sweetpotato value chains: Na ordered probit analysis. **Food Security**, 11(5), 1101–1120

SILVA, G. M. da; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de.; QUEIROZ, A. J. de M.; SILVA, E. T. de V.; MOURA, H. V.; de; SILVA, A. P. de F.; SANTOS, N. C.; PAIVA, Y. F.; SANTOS, F. S. dos; MOREIRA, I. dos S.; CAMPOS, A. R. N. Synergistic effect of dual pretreatments and temperature gradients on convective drying and preservation of bioactive compounds in purple sweet potato. **Food and Bioproducts Processing**, 152, 165-177, 2025.

SILVEIRA, P. G.; SILVA, C. R. de P.; CORRÊA, J. L. G.; PETRI, I. J.; BORGES, S. V. Parâmetros de processo e qualidade do yacon seco por convecção: influência do tratamento com etanol. **Food Research International**, [S.l.], v. 169, p. 113863, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113863>.

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

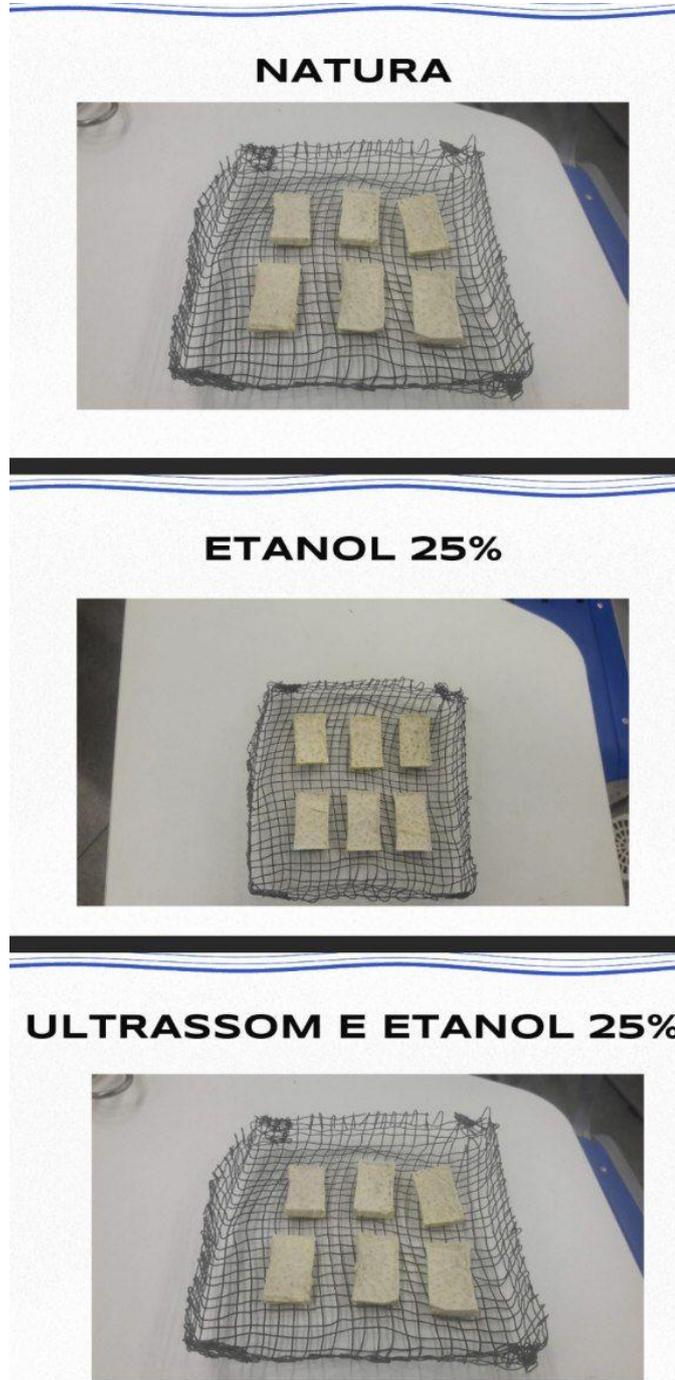
YANG, X.; WANG, C.; LI, H.; MA, F.; ZHANG, W.; MUJUMDAR, A. S.; LIN, Y. Effect of ultrasound-assisted hot air drying on drying kinetics and quality attributes of sweet potato slices. **Drying Technology**, v. 39, n. 6, p. 728-739, 2021.

XU, B., TILIWA, E. S., YAN, W., AZAM, S. M. R., WEI, B., ZHOU, C., ET AL. (2021). Recent development in high quality drying of fruits and vegetables assisted by ultrasound: A review. **Food Research International**, 110744.

ZHAO, R.; XIAO, H.; LIU, C.; WANG, H.; WU, Y.; BEM, A.; WANG, Y. Dynamic changes in volatile and non-volatile flavor compounds in lemon flavedo during freeze-drying and hot-air drying, **LWT**, v.175, 114510, 2023.

APÊNDICE A

Figura 4. Amostras secas sem pré-tratamento (Natura), e com pré-tratamentos Etanol25% e USEtanol25%



Fonte: O autor (2025)