



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Química
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos



ÉRIKA DA CRUZ DOS REIS

**EFEITO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE SECAGEM
NA OBTENÇÃO DE QUEIJO MUÇARELA DESIDRATADO**

Patos de Minas - MG

2026

ÉRIKA DA CRUZ DOS REIS

**Efeito de diferentes metodologias de secagem na obtenção
de queijo muçarela desidratado**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos da Universidade Federal de
Uberlândia campus Patos de Minas, como
requisito necessário à obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Alimentos
Orientador: Prof. Dr. Neiton Carlos da Silva
Coorientadora: Prof. Dra. Marta Fernanda
Zotarelli

Patos de Minas - MG

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R375e
2026

Reis, Érika da Cruz dos, 2001-
Efeito de diferentes metodologias de secagem na obtenção de queijo
muçarela desidratado [recurso eletrônico] / Érika da Cruz dos Reis. -- 2026.

Orientador: Neiton Carlos da Silva.
Coorientadora: Marta Fernanda Zotarelli.
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11070>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Tecnologia de alimentos. I. Silva, Neiton Carlos da, 1985-, (Orient.).
II. Zotarelli, Marta Fernanda, 1985-, (Coorient.). III. Universidade Federal
de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.
IV. Título.

CDU: 664

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Patos de Minas
Rua Vereador Chico Filgueira, 33, 3º andar, Sala 21 - Bairro Caiçaras, Patos de Minas-MG, CEP 38702-178
Telefone: (34) 3823-3714 - www.ppgea.feq.ufu.br - coordppgea@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia de Alimentos				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico n. 8/2026 - PPGEA				
Data:	Vinte e oito de agosto de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:15
Matrícula do Discente:	42412EAL006				
Nome do Discente:	Érika da Cruz dos Reis				
Título do Trabalho:	Efeitos de diferentes metodologias de secagem na obtenção de queijo muçarela desidratado				
Área de concentração:	Engenharia de Alimentos				
Linha de pesquisa:	Desenvolvimento de Processos e Produtos				

Reúne-se por webconferência (ConferênciaWeb - RNP) a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, assim composta: Neiton Carlos da Silva (Presidente/Orientador), Priscila Cristina Bizam Vianna (Membro Externo) e Ricardo Corrêa de Santana (Membro UFU).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa apresentou a Comissão Examinadora e a discente, agradeceu a participação do público e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação se deu em conformidade às normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos legais, a Banca Examinadora, em sessão reservada, atribuiu o conceito final, considerando a discente:

Aprovada

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico integra os requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme será assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Neilton Carlos da Silva, Presidente**, em 28/08/2026, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

tps://sei.ufu.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisar&id_procedimento=8471707&id_documento=... 1/2

09/2026, 16:19

SEI/UFU - 7634343 - Ata de Defesa - Pós-Graduação



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/08/2026, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PRISCILA CRISTINA BIZAM VIANNA, Usuário Externo**, em 28/08/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7634343** e o código CRC **2A3EEDBA**.

Aos meus pais Olga e Evando, minha
âncora, enquanto navegava em direção
aos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Em todos os momentos da minha vida, bons ou ruins, dou honra e glória a Deus, pois Ele é o dono de tudo, e sua vontade é perfeita. Sempre bom. Quando eu mudo, Ele não muda. Agradeço não por concluir mais uma etapa, mas por Ele permitir que assim seja e se fazer através de mim. Agradeço também a intercessão de São José Operário, protetor dos trabalhadores, conhecedor do esforço diário e fortalecedor nas dificuldades; e Santa Teresinha do Menino Jesus, doutora da Igreja, que me ensinou que nada é pequeno se feito com amor.

Aos meus pais, Olga e Evando, meus pés no chão enquanto fui sonho, minha âncora enquanto singrei, minha base enquanto alcancei voos. Ao longo de toda a minha trajetória, testemunhei o esforço de vocês para me proporcionar oportunidades que lhes foram negadas na infância. Muitas vezes ouvi que não seria possível me ser deixado uma grande riqueza, mas hoje compreendo que recebi um patrimônio infinitamente maior. Busco este título também para vocês. Essa é a prova de que cada sacrifício, cada renúncia e cada esforço valeram a pena. Obrigada por me ensinarem que sonhos também se constroem com trabalho duro, e assim apenas, sem atalhos.

À minha irmã Evelyn, minha metade. Agradeço por estar ao meu lado em todos os momentos, por acreditar em mim, torcer por minhas conquistas e, tantas vezes, me mostrar caminhos que eu ainda não conseguia enxergar. Obrigada por ser minha calma nos dias difíceis, minha clareza diante das dúvidas e meu direcionamento quando me faltava rumo. Parte de quem sou carrega você. E, em cada conquista minha, existe também um pouco de nós.

Aos meus familiares e amigos, por me manterem em suas orações, por sempre torcerem pelas minhas realizações, por serem família para os momentos bons e ruins. Sei que nunca estou sozinha, porque tenho vocês.

Aos meus orientadores Neiton e Marta, por toda ajuda, conselhos, sugestões. Por estarem sempre dispostos e abertos desde o primeiro dia de ingresso na pós-graduação. Muito obrigada pela confiança em nosso projeto e por acreditarem no meu potencial.

Aos técnicos dos laboratórios do PPGEA de Patos de Minas, por todo auxílio durante a realização do projeto, pelas ideias, e parceria em cada análise realizada.

Aos colegas, pela parceria e pelas palavras de motivação em dias que pensávamos não sermos capazes.

A todos direta ou indiretamente envolvidos, muito obrigada!

*"Mostrai, ó Deus, o vosso poder, esse
poder com que atuastes em nosso favor".*

Salmo 67, 29.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Queijo tipo muçarela	5
Figura 2 - Fluxograma de produção de queijo muçarela	6
Figura 3 - Enformagem da muçarela	7
Figura 4 - Muçarela em salmoura.....	7
Figura 5 - A_w e reações de deterioração em alimentos	9
Figura 6 - Curvas típicas de secagem	11
Figura 7 - <i>Snacks</i> de queijo obtidos por MWVD	16
Figura 8 - Amostras em processo de derretimento na estufa cortadas inicialmente em formato de fatias (a), cubos (b) e raladas (c).....	21
Figura 9 - Amostras secas após estufa cortadas inicialmente em formato de fatias (a), cubos (b) e raladas (c).....	21
Figura 10 - Cortador de legumes.....	22
Figura 11 - Micro-ondas convencional doméstico	22
Figura 12 - Estufa de circulação forçada	23
Figura 13 - Liofilizador de bancada	24
Figura 14 - Air fryer.....	25
Figura 15 - Analisador de atividade de água	26
Figura 16 - Representação da cor em um sistema de coordenadas do CIE	28
Figura 17 - Colorímetro digital	28
Figura 18 - Triturador modelo IKA A11 basic	29
Figura 19 - Análise de dureza no texturômetro	30
Figura 20 - Pobre utilizada no texturômetro	30
Figura 21 - Processo de secagem do queijo muçarela em micro-ondas à potência de 70 W	33
Figura 22 - Higroscopicidade das amostras secas em micro-ondas	34
Figura 23 - Deformação das amostras secas em micro-ondas	39
Figura 24 - Cinética de secagem da secagem de muçarela por micro-ondas	42
Figura 25 - Amostra seca em estufa.....	44
Figura 26 - Higroscopicidade das amostras secas na estufa	45

Figura 27 - Deformação das amostras secas em estufa de circulação forçada	49
Figura 28 - Cinética de secagem das amostras secas por estufa de circulação forçada	53
Figura 29 - Aspecto das amostras de muçarela após secagem em liofilizador por 48 h.	54
Figura 30 - Higroscopicidade das amostras secas no liofilizador	56
Figura 31 - Deformação das amostras liofilizadas.....	60
Figura 32 - Cinética de secagem das amostras liofilizadas.....	62
Figura 33 - Muçarela em processo de derretimento na <i>air fryer</i>	64
Figura 34 - Higroscopicidade das amostras secas na <i>air fryer</i> modo "assar"	66
Figura 35 - Deformação das amostras secas na <i>air fryer</i> modo "assar" ...	69
Figura 36 - Cinética de secagem das amostras secas na <i>air fryer</i> no modo "assar"	71
Figura 37 - Higroscopicidade das amostras secas na <i>air fryer</i> modo "fritar sem óleo"	73
Figura 38 - Deformação das amostras secas na <i>air fryer</i> modo "fritar sem óleo"	77
Figura 39 - Cinética de secagem em amostras secas na <i>air fryer</i> no modo "fritar sem óleo"	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição básica do queijo muçarela	6
Tabela 2 - Resultados dos parâmetros de cor para a amostra <i>in natura</i> ..	32
Tabela 3 - Resultados da secagem de muçarela em micro-ondas	33
Tabela 4 - Resultados de cor das amostras secas no micro-ondas	36
Tabela 5 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002) na secagem por micro-ondas	41
Tabela 6 - Resultados da secagem em estufa	44
Tabela 7 - Resultado dos parâmetros de cor das amostras secas em estufa	46
Tabela 8 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002) na secagem por estufa de circulação forçada	51
Tabela 9 - Resultados da secagem em liofilizador	55
Tabela 10 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas em liofilizador	58
Tabela 11 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002) para as amostras liofilizadas	62
Tabela 12 - Resultados das amostras secas na <i>air fryer</i> modo assar	65
Tabela 13 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas no modo assar da <i>air fryer</i>	66
Tabela 14 - Parâmetros do modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002) estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais para as amostras secas na <i>air fryer</i> modo "assar"	70
Tabela 15 - Resultados amostras secas na <i>air fryer</i> modo "fritar sem óleo"	72
Tabela 16 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas no modo fritar sem óleo da <i>air fryer</i>	74
Tabela 17 - Parâmetros obtidos para o modelo de Midilli <i>et al.</i> (2002) para as amostras secas na <i>air fryer</i> modo "fritar sem óleo"	79

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	Objetivo geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Queijos	4
2.2	Processo produtivo do queijo muçarela	5
2.3	Secagem de alimentos e atividade de água	7
2.4	Cinética de secagem	10
2.5	Métodos de secagem de alimentos	11
2.6	Processos de secagem em queijos	12
2.6.1	Secagem em micro-ondas	14
2.6.2	Secagem em estufa de circulação forçada de ar	16
2.6.3	Secagem em liofilizador	17
2.6.4	Secagem em <i>Air fryer</i>	18
3	METODOLOGIA	20
3.1	Material Utilizado	20
3.2	Formato e armazenamento das amostras	20
3.3	Metodologias de secagem	22
3.3.1	Secagem por micro-ondas	22
3.3.2	Secagem por estufa	23
3.3.3	Secagem em liofilizador	23
3.3.4	Secagem em <i>air fryer</i>	24
3.4	Análises físico-químicas das amostras antes e após secagem	25
3.4.1	Umidade	25
3.4.2	Atividade de água (a_w)	26

3.4.3	Higroscopicidade	26
3.4.4	Cor	27
3.4.5	Textura	29
3.4.6	Cinética de Secagem	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Amostra <i>in natura</i>	32
4.2	Secagem em micro-ondas	32
4.2.1	Considerações gerais, umidade e atividade de água	32
4.2.2	Higroscopicidade	34
4.2.3	Cor	35
4.2.4	Textura - Análise de deformação	38
4.2.5	Cinética de secagem	40
4.3	Secagem em estufa de circulação forçada	43
4.3.1	Considerações gerais, umidade e atividade de água	43
4.3.2	Higroscopicidade	45
4.3.3	Cor	46
4.3.4	Textura - Análise de deformação	49
4.3.5	Cinética de secagem	51
4.4	Secagem em liofilizador	54
4.4.1	Considerações gerais, umidade, atividade de água e higroscopicidade	54
4.4.2	Cor	58
4.4.3	Textura - Análise de deformação	60
4.4.4	Cinética de secagem	61
4.5	Secagem em <i>air fryer</i>	64
4.5.1	Modo “assar”	64
4.5.2	Modo fritar sem óleo	72

5	COMPARATIVO ENTRE AS CONDIÇÕES DE SECAGEM	82
6	CONCLUSÕES	84
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86

RESUMO

Uma das formas mais tradicionais de manipulação de leite para obtenção de um novo produto visando sua melhor conservação é o queijo. Trata-se de um produto que possui diversas classificações quanto ao seu tipo de processamento e sabor, além de variadas formas de ingestão. A muçarela é um dos tipos de queijo mais consumidos no Brasil por seu valor acessível e versatilidade, além de permitir uma gama de transformações em estudos de desidratação como alternativa numa busca de um processo mais rápido, econômico, e de menor impacto nas características físico-químicas do produto. Neste trabalho, verificou-se o uso do micro-ondas, estufa de circulação forçada, liofilizador e *air fryer* para obtenção de muçarela desidratada e sua caracterização após seca. Os diferentes métodos utilizados impactaram nos parâmetros avaliados e apresentaram variações entre eles, mesmo que todos tenham se mostrado eficientes quanto a obtenção de um produto com umidade e atividade de água classificados como ideais, abaixo de 5% e entre 0,300 e 0,500, respectivamente. O micro-ondas foi o secador com melhor avaliação em relação ao tempo de processamento, sendo possível obter amostras secas em 6 minutos de processo na potência de 700 W, ao passo que a estufa de circulação forçada foi o método de maior duração, sendo o processo mais rápido obtido em 45 minutos na temperatura de 150°C. Mesmo assim, vale considerar a estufa como método tradicional e de fácil de aplicação. A nível de qualidade tecnológica, com maior conservação de cor e características mecânicas, a liofilização apresentou resultados superiores, mas também necessitada de um maior tempo de processamento de no mínimo 12 horas. A *air fryer* foi o método mais recente empregado, de maior rapidez quando comparada ao liofilizador e estufa, e de eficiência operacional quando comparada ao micro-ondas, no modo “assar”. De modo geral, a escolha do melhor secador variou conforme as condições esperadas para o processamento e características finais do produto obtido.

Palavras-chave: *air fryer*, atividade de água, cinética de secagem, estufa, liofilização, micro-ondas.

ABSTRACT

Cheese is one of the most traditional ways of processing milk into a product with improved preservation. It is a product that can be classified in various ways based on processing methods and flavor profiles, providing a wide range of consumption options. Mozzarella is one of the most widely consumed cheeses in Brazil due to its affordability and popularity; furthermore, its characteristics make it suitable for dehydration studies aimed at developing faster and more economical processes while minimizing changes in its physicochemical properties. This study evaluated the use of a microwave oven, a forced-air oven, a freeze-dryer, and an air fryer to produce dehydrated mozzarella and characterized the resulting products after drying. The different methods influenced the evaluated parameters and resulted in distinct responses, although all methods were effective in producing samples with moisture content and water activity levels classified as ideal —below 5% and between 0.300 and 0.500, respectively. The microwave oven provided the shortest processing time, yielding dried samples to be obtained in 6 minutes at a power of 700 W, whereas the forced-air oven was the most time-consuming method, with the fastest process taking 45 minutes at a temperature of 150°C. Nevertheless, the forced-air oven remains a valuable, traditional, and easy-to-implement method. Regarding technological quality, particularly the preservation of color and mechanical properties, freeze-drying yielded the best results, although it required a longer processing time. The air fryer provided shorter processing times than the freeze-dryer and forced-air oven and showed operational efficiency comparable to that of microwave oven when operated in the "roast" mode. Overall, the choice of the most appropriate drying method depends on the specific processing requirements and the desired product characteristics.

Keywords: air fryer, water activity, drying kinetics, oven, freeze-drying, microwave.

1 INTRODUÇÃO

Um dos setores de maior importância no segmento agropecuário nacional é a cadeia láctea, desde a obtenção dos seus subsídios até o produto na forma de leite integral, desnatado, semidesnatado, ou seus derivados, como iogurtes, manteiga, doces e queijos. Nesse contexto, a indústria de queijos se destaca como um dos campos de maior crescimento e relevância, ressaltando entre as suas mais variadas classificações, a muçarela, um dos queijos de maior consumo no Brasil. As características do leite e variáveis tecnológicas do processo estão associadas ao rendimento da muçarela, evidenciando a importância da integração entre os diferentes elos da cadeia láctea. A eficiência de sua produção está diretamente relacionada à qualidade e à composição do leite, bem como às condições de processamento, fatores que influenciam o rendimento e a qualidade do produto ((El-Bakry; Sheehan, 2014; Sales *et al.* 2017).

Sabe-se que o teor de umidade presente em um alimento é fator determinante de sua perecibilidade e impacta na forma de sua estocagem. Dito isso, a muçarela, por se tratar de um derivado lácteo, possui uma vida útil variável e influenciada pela sua composição nutricional, atividade de água e condições de armazenamento a que for submetida. É um produto de alta perecibilidade química e biológica, e de necessidade de refrigeração para sua conservação (Anli, 2020; Martins *et al.*, 2018).

Em produtos derivados do leite, uma das análises em crescente expansão e de grande importância é a aplicação de diferentes métodos de remoção de água, seja por aquecimento ou por processos que envolvam resfriamento/congelamento, como a liofilização. A escolha do método de desidratação mais adequado varia conforme a composição do alimento a ser avaliado, sendo que a maioria dos secadores utilizados são baseados na aplicação de um fluxo de ar quente sobre a superfície alimentar. O uso de métodos de secagem para redução de umidade e atividade de água é uma maneira de aumentar o tempo de conservação de queijos e prolongar sua vida útil obtendo por fim um produto desidratado e que tenha condições desfavoráveis para o desenvolvimento microbiano, além da expansão de suas formas de ingestão pelos consumidores que estão cada vez mais preocupados em adquirirem

produtos mais proteicos e de praticidade de consumo (Rita *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2018).

A secagem da muçarela constitui um desafio tecnológico devido à natureza termossensível e à complexa organização estrutural desse alimento, cuja matriz é formada por uma rede proteica de caseína que aprisiona água, gordura e sais minerais. Durante o aquecimento, a muçarela apresenta alterações importantes em suas propriedades viscoelásticas, com redução da rigidez da matriz a partir de aproximadamente 40 a 45°C, associada principalmente à liquefação da fase lipídica, e comportamento de fusão e fluxo mais pronunciado próximo a 60°C, sendo que a aplicação de altas temperaturas na secagem desse alimento pode ocasionar amolecimento da matriz, a mobilização e a liberação de gordura, de modo a comprometer a estrutura do produto. Vale destacar também que o variado comportamento da muçarela durante o aquecimento propicia a formação de uma camada superficial desidratada, estando relacionada a alteração de suas propriedades de fusão e textura (Gonçalves; Cardarelli, 2020; Gulati; Datta, 2015; Simão *et al.*, 2025).

Na literatura é frequente a aplicação de métodos de secagem em queijos tipo cheddar, parmesão, parmesão ralado e outros, mas percebe-se uma escassez de estudos para a secagem em queijo tipo muçarela. Trata-se de um tipo muito comercializado no país, com um mercado consumidor estabelecido e de ampla aplicabilidade gastronômica. Quando desidratado, seja em pó, pedaços, chips, ou fatias, é utilizado na preparação de sopas, temperos, molhos, recheios, coberturas, além de se tornar, neste estado, um produto mais compacto facilitando o seu armazenamento e transporte. Outro fato a se levar em consideração quando se avalia a aplicabilidade de métodos de secagem em queijos, especialmente a muçarela, é a retirada deste alimento da faixa de crescimento microbiano ao reduzir sua umidade e atividade de água, obtendo-se um produto dispensado de refrigeração e de uma maior vida útil, quando comparada a sua forma antes da secagem. Nesse contexto, torna-se importante realizar uma busca por alternativas de secagem e suas condições de processo para a manipulação da muçarela, com facilidade de aplicação, definindo qual o melhor método de escolha para obtenção deste produto na sua forma seca e com menor impacto em suas características físico-químicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito de diferentes metodologias de secagem na obtenção de queijo tipo muçarela desidratado, levando em consideração a influência dos parâmetros operacionais (potência, temperatura e tempo) na cinética de secagem e nas propriedades físico-químicas e estruturais do produto seco.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar a influência das diferentes condições operacionais (temperatura, potência e tempo de secagem) nos secadores tipo micro-ondas, estufa de circulação forçada, liofilizador e *air fryer* nas características físico-químicas da muçarela desidratada;
- Ajustar modelos cinéticos aos dados experimentais de cada método e avaliar a adequação e a coerência física dos parâmetros obtidos;
- Estabelecer critérios de seleção do método de secagem em função das características desejadas no produto final com base no desempenho para desidratação da muçarela e melhores características finais, como cor, textura e higroscopicidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Queijos

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) define como queijo:

o produto fresco ou maturado que se obtém por separação parcial do soro do leite ou leite reconstituído (integral, parcial ou totalmente desnatado), ou de soros lácteos coagulados pela ação física do coalho, de enzimas específicas, de bactéria específica, de ácidos orgânicos, isolados ou combinados, todos de quantidade apta para uso alimentar, com ou sem agregação de substâncias alimentícias e/ou especiarias e/ou condimentos, aditivos especificamente indicados, substâncias aromatizantes e matérias corantes (Brasil, 1996).

Estruturalmente, o queijo é uma matriz lipoprotéica com textura variável a depender da umidade. O grau de maturação, os teores de gordura e proteína, características bioquímicas e microbiológicas do leite que o originará também influenciam em sua textura, aspecto visual e formação nutricional (El-Bakry; Sheehan, 2014; Koca *et al.*, 2015).

Inicialmente, esse produto era elaborado em pequena escala agrícola, mas devido ao seu grande consumo mundial passou a ser produzido a nível industrial tanto como alimento independente, quanto como ingrediente, com critérios de qualidade definidos a nível de exigência do consumidor. Dentre estas características de qualidade destaca-se a reológica, relacionada ao derretimento, amolecimento, fluidez, viscosidade e elasticidade. Estes fatores são influenciados pela composição do alimento, como partículas de caseína, e por fatores ambientais, como sua forma de maturação (Atik; Huppertz, 2023; Koca *et al.*, 2015).

O mapeamento regional da produção de lácteos no Brasil é limitado pela escassez de dados regionais e por produtos derivados do leite. Mesmo assim, destaca-se na fabricação de laticínios a produção de queijos e outros derivados, que juntos representam cerca de 50,8% do total da produção atingindo cerca de R\$ 28 bilhões (Fundação Getúlio Vargas, 2023).

Por sua composição com níveis consideráveis de proteínas, minerais, vitaminas e gorduras o queijo é um dos derivados lácteos de maior consumo mundial, justificado pela sua variedade de texturas, sabor e valor nutricional. Devido à sua versatilidade culinária, preço acessível e características sensoriais, um dos queijos de maior consumo pela população é o do tipo muçarela ((Matera *et al.*, 2018; Dezani *et al.*, 2015).

No Brasil, este é um dos queijos mais consumidos principalmente em pizzas e lanches, sendo por esse motivo também chamado de “queijo para pizza”. Originada na Itália, a muçarela possui superfície brilhante, macia e lisatextura elástica (Akhtar *et al.*, 2023; Brasil, 2020; Kindstedt, 2019).

2.2 Processo produtivo do queijo muçarela

A legislação brasileira define o queijo tipo muçarela como:

o queijo que se obtém por filagem de uma massa acidificada (produto intermediário obtido por coagulação de leite por meio de coalho e/ou outras enzimas coagulantes apropriadas), complementada ou não pela ação de bactérias lácticas específicas (Brasil, 1997).

A muçarela pode ser classificada como de média, alta ou muito alta umidade e extragorda, gorda e semigorda. De modo geral possui como características sensoriais uma consistência suave, cor branca a amarelada que varia conforme o conteúdo de umidade e matéria gorda, e ausência de crosta e olhaduras, como mostra a Figura 1 (Brasil, 1997; Perry, 2004).

Figura 1 - Queijo tipo muçarela



Fonte: reprodução da internet.

A composição básica desse tipo de queijo segue os valores apresentados na Tabela 1.

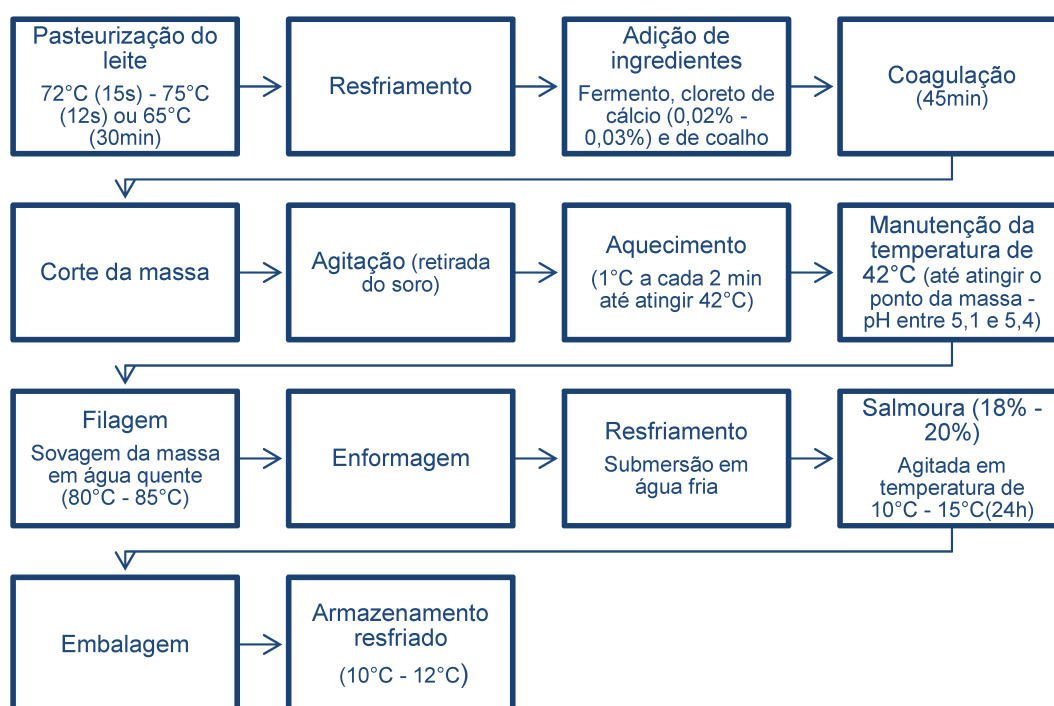
Tabela 1 - Composição básica do queijo muçarela

Parâmetro	Valor Médio
Umidade	43% - 46%
Gordura	22% - 24%
Teor de sal	1,6% - 1,8%
pH	5,1 – 5,3

Fonte: (Silva, 2016).

O processamento do queijo muçarela pode ser resumido nas seguintes etapas apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma de produção de queijo muçarela



Fonte: Adaptado de Silva, 2016.

Para produção do queijo muçarela, em seguida, são adicionados ingredientes para a caseína presente no leite, já pasteurizado, coagular e originar a massa (coalhada). A massa pronta, depois da adição de todos os ingredientes, é então cortada, agitada e cozida, aumentando a temperatura em 1°C a cada 2 min, até atingir a temperatura de 42°C. Depois, realiza-se o processo de filagem, no qual a massa é sovada até adquirir uma textura alongada e fibrosa. Em seguida, ocorre a enformagem (Figura 3), responsável por conferir ao queijo sua forma característica. A forma é submersa em água gelada (10°C a 12°C por 1 a 2h), dentro do tanque de coagulação, para resfriar e depois seguir para a salmoura (Embrapa, 2014; Silva, 2016).

Figura 3 - Enformagem da muçarela



Fonte: (Embrapa, 2014).

O produto, então, segue para a salga (Figura 4), etapa importante para o desenvolvimento do sabor, controle da umidade, cura e conservação do produto, e, por fim, embalagem e armazenamento (Embrapa, 2014; Silva, 2016).

Figura 4 - Muçarela em salmoura



Fonte: reprodução da internet.

Depois de pronta, a muçarela pode ser consumida de forma imediata ou apresentar um período de 10 a 15 dias de maturação na própria embalagem. A temperatura de refrigeração inibe o crescimento de microrganismos contaminantes e, por isso, o queijo muçarela deve ser armazenado em ambiente refrigerado, a fim de aumentar seu tempo de validade (Embrapa, 2014; Silva, 2016).

2.3 Secagem de alimentos e atividade de água

De modo geral, a secagem de alimentos consiste na remoção de sua água livre retardando a atividade microbiana e diminuindo reações enzimáticas. Qualquer alimento, independentemente de sua matriz, contém água em sua composição seja em maior ou menor proporção. A umidade livre corresponde à diferença entre a umidade total do sólido e a umidade de equilíbrio nas condições do meio de secagem

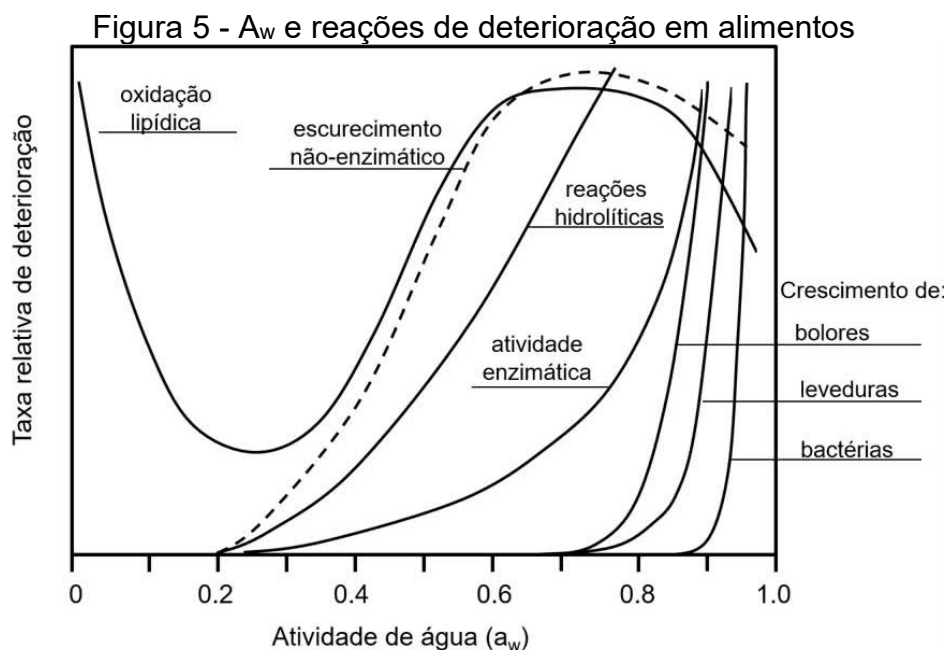
($X = X_T - X^*$). A umidade que não pode mais ser removida nas condições específicas do processo corresponde à umidade de equilíbrio (X^*). A água classificada como ligada pode ser removida durante a secagem; à medida que a umidade do material diminui, o processo prossegue até que seja atingida a condição de equilíbrio correspondente às condições do meio. Durante o processo de secagem para determinação de umidade não somente a água será retirada, mas outras substâncias voláteis (; Khan *et al.*, 2017; Luo *et al.*, 2021).

O princípio da secagem está baseado na diferença entre a pressão de vapor de água contida no sólido ou em uma suspensão e a pressão de vapor de água do ar ambiente. Se trata de um mecanismo de transferência de calor e massa, com possibilidade de utilização em larga escala e boa rentabilidade devido a fatores econômicos envolvidos como, por exemplo, em relação à logística, já que um alimento desidratado permite ser transportado e armazenado sem refrigeração ou em embalagens menores, devido à redução da massa e volume resultando em um produto compacto (Anli, 2020; Ouaabou *et al.*, 2018).

Os processos de secagem também estão relacionados ao conceito de atividade de água (a_w) do material avaliado. Conforme a literatura, a atividade de água consiste na água disponível em um alimento, para a ocorrência de reações químicas e enzimáticas, bem como crescimento microbiológico, impactando no seu processo de deterioração. Ela é definida como a razão entre a pressão de vapor da água no alimento e a pressão de vapor saturado da água pura nessa mesma temperatura. Assim, quando a a_w se apresenta com valores próximos ou igual a 1,00 a quantidade de água disponível é 100% ou próximo a isso, e alimentos com a_w em torno desse valor são classificados como frescos e altamente perecíveis (Bhandari; Adhikari, 2008; Chen; Patel, 2008; Fellows, 2006).

Considera-se que quando a atividade de água se apresenta em valores inferiores a 0,60 a atividade microbiana é reduzida, se as condições de armazenamento e ambientais forem controladas. A oxidação lipídica e outras reações são minimizadas quando a a_w está em valores próximos a 0,40, e a maioria das bactérias, leveduras e fungos têm seu crescimento inibido em valores inferiores à 0,90, 0,80 e 0,70, respectivamente (Bhandari; Adhikari, 2008; Chen; Patel, 2008;

Fellows, 2006), conforme mostra a Figura 5 em que se tem a relação da taxa de diferentes reações de deterioração em função da atividade de água de alimentos.



Fonte: Adaptado de Chen e Patel (2008).

Alimentos estáveis, portanto, geralmente são formulados numa faixa de atividade de água próxima a 0,30, em que as reações físico-químicas estão reduzidas e a velocidade da oxidação é considerada mínima. Em níveis inferiores a 0,20, o material com maior concentração lipídica estará sujeito a rancidez após certo período de armazenamento. Isso acontece porque, nesse intervalo, a monocamada de água que normalmente se forma ao redor das moléculas lipídicas é praticamente inexistente, o que reduz a proteção contra o oxigênio. Com a exposição direta, inicia-se o processo de oxidação lipídica. A oxidação também está associada ao desenvolvimento de *off-flavours* em certos produtos, perda de vitaminas lipossolúveis e pigmentos (Chen; Patel, 2008; Sablani; Rahman, 2008).

Desse modo, para aplicar o processo de secagem em qualquer alimento deve-se levar em consideração a atividade de água dele *in natura* e estabelecer um limite de seu valor pós secagem dentro de uma margem com menor possibilidade de alterações do produto seco, quando este for estocado. Ao observar a Figura 5 percebe-se que na faixa entre 0,30 e 0,50 o desenvolvimento de micro-organismos está inibido, as reações hidrolíticas e a atividade enzimática ainda não estão em seus pontos máximos, além da oxidação lipídica não ser tão significativa. Secar alimentos

até uma atividade de água nesta faixa limite pode ser um dos fatores para se obter um produto com características físico-químicas e microbiológicas mais estáveis no armazenamento e uma maior vida útil do produto (Bhandari; Adhikari, 2008; Chen; Patel, 2008).

2.4 Cinética de secagem

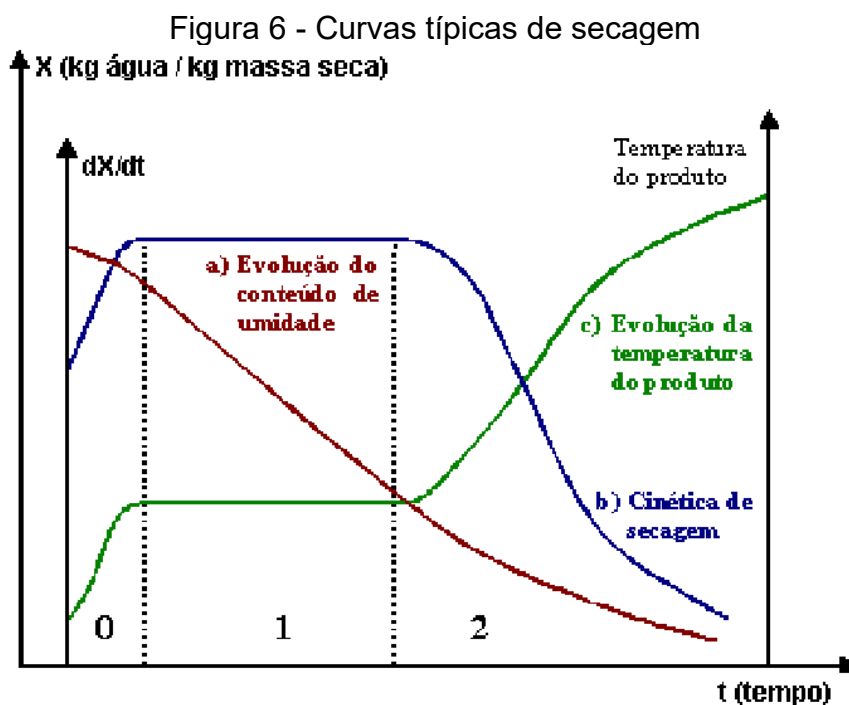
O comportamento da perda de umidade de um material sólido em função do tempo, durante o processo de secagem, é definido como cinética de secagem. A partir dos estudos de cinética é possível prever o desempenho do material avaliado durante o processo de remoção de umidade e instituir equações de variação de umidade em diferentes períodos do processo a partir de modelos matemáticos. Essas previsões impactam em projetos, escolha de secadores e em suas condições de operação (Moreira, 2000; Parry, 1985).

Classifica-se os modelos de cinética em três tipos: empíricos, com flexibilidade de abordagem, porém pouca credibilidade além da faixa medida; semi-empíricos, com maior fundamentação teórica, mas com simplificações segundo as condições que são submetidos; e teóricos, aqueles que possuem uma matemática complexa e parâmetros desconhecidos, mas são semelhantes aos conceitos teóricos básicos, o que lhes confere maior credibilidade e reconhecimento das interrelações entre as variáveis (Moreira, 2000; Parry, 1985).

A Figura 6 exemplifica as curvas obtidas em processos de secagem, em que a curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem em relação à evolução do tempo de secagem (t); a curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo (t), ou seja, a cinética de secagem; e a curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t).

O período indicado no gráfico como “0” indica o início da secagem, momento em que a temperatura e a pressão de vapor de água se elevam gradualmente até que a transferência de calor ao produto seja suficiente para sustentar a evaporação na superfície (transferência de massa – evaporação da água).

Nesse ponto, estabelece-se um equilíbrio entre as taxas de transferência de calor e de massa, o que mantém a velocidade de secagem constante no segundo período (1), caracterizado pela taxa de secagem constante enquanto houver água livre na superfície do material (Park *et al.*, 2001; Martins *et al.*, 2020).



Fonte: Park *et al.* (2001).

Quando a quantidade de água da superfície do material utilizado diminuir, a transferência de massa também reduz e a taxa de secagem passa a ser decrescente, conforme exemplificado no período 2 da Figura 6. Durante este período, a temperatura do produto aumenta até se aproximar da temperatura do ar de secagem. Após a remoção significativa de água, o produto atinge a umidade de equilíbrio, momento em que o processo de secagem é encerrado. O fator limitante desta etapa é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto, o que pode levar a longos tempos de processo (Park *et al.*, 2001; Martins *et al.*, 2020).

2.5 Métodos de secagem de alimentos

É comum que os equipamentos utilizados para secagem utilizem os três mecanismos básicos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) durante o processo, sendo que o calor pode ser aplicado diretamente por meio de um

gás aquecido ou indiretamente através de uma superfície aquecida. Alguns métodos como o micro-ondas, infravermelho e radiofrequência, sendo estas fontes eletromagnéticas, também são aplicados para otimizar processos de desidratação, com a vantagem de possuir a capacidade de penetrar diretamente no material sem necessidade de um meio material para propagação, tornando a transferência de calor mais eficiente. Atrelado ao fato de o ar em contato com a superfície do alimento não aquecer tanto quanto nos métodos de convecção forçada, o resultado deste processo são produtos secos com boas características sensoriais e uma diminuição do custo energético (Cunha *et al.*, 2021; Elnaker *et al.*, 2021; Kartini *et al.*, 2023).

Como pode se observar, a escolha do secador a ser utilizado dependerá de sua capacidade de preservar e/ou de causar menor impacto nas características do produto a ser submetido a ele. Isso, atrelado a necessidade da indústria alimentícia por processos de conservação e redução de custo operacionais, se faz fundamental uma busca por métodos de secagem alternativos e eficientes, o que justifica um crescente avanço de estudos comparativos de metodologias de secagem, seja em queijos ou em outros alimentos (Cunha *et al.*, 2021; Elnaker *et al.*, 2021).

2.6 Processos de secagem em queijos

Durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de aumentar a vida útil desses alimentos, surgiram os queijos desidratados, produtos que perduram até hoje devido a sua importância econômica. Os produtos oriundos desta desidratação podem ser utilizados como suplementos de nutrição, ingredientes funcionais, produtos de panificação e de uso em saladas, refeições prontas, entre outros. Por apresentarem menor atividade água (a_w), maior estabilidade e maior diversidade de sabores, são produtos que também facilitam processos produtivos de alimentos formulados (Koca *et al.*, 2015; Guinee, 2016).

Guinee (2016) considera que para obter uma secagem mais eficiente e uma redução de agregação de partículas e oxidação, os queijos considerados mais adequados são aqueles classificados como duros e quebradiços, com sabor intenso, baixo teor de água e de gordura na matéria seca, a exemplo do parmesão. Todavia, é possível aplicar tais técnicas na muçarela e outros tipos de queijos.

Assim, quando se fala da aplicação de secagem em queijos é preciso retomar seus conceitos estruturais. Por exemplo, na muçarela recém-fabricada, uma fração da água está presente em canais circundando as camadas de gorduras. Após certo tempo de fabricação essa água livre migrará lentamente para a matriz proteica, onde se localiza em sua maioria. A extensão da degradação de caseína durante o armazenamento do produto também afetará as amostras, pois neste período ocorre a proteólise, onde a caseína é decomposta em fragmentos por enzimas residuais (Tunick, 2010; Vogt *et al.*, 2015).

No aquecimento, enquanto algumas ligações e interações diminuem em número e força, as interações eletrostáticas e hidrofóbicas entre proteínas aumentam e esta mudança no equilíbrio de forças impacta tanto nas interações caseína-caseína quanto nas interações caseína-água. Durante a fusão ocorre também a transição da gordura para o estado líquido, processo de suma importância para as propriedades de derretimento do alimento (Tunick, 2010; Vogt *et al.*, 2015).

O queijo fresco possui uma elevada atividade de água (em torno de 0,95) o que o caracteriza como um alimento de fácil deterioração microbiológica, mesmo quando mantido sob refrigeração. A obtenção de um produto seco com uma atividade de água em uma faixa de maior estabilidade é uma opção de conservação e redução de custos a nível industrial, quando se pensa em armazenamento e logística, ainda que as operações de secagem necessitem muitas vezes de altos investimentos em equipamentos e gastos com energia (Rita *et al.*, 2017; Zarein *et al.*, 2015).

Caracterizado como um material viscoelástico clássico, o queijo foi um dos primeiros alimentos a ser submetido a análises por métodos reológicos fundamentais. Na literatura, quando se busca por aplicação de secagem neste produto, independentemente de sua classificação, é comum encontrar comparação de metodologias e secadores na busca por um melhor método de secagem. Rita *et al.* (2017) utilizaram estufa, micro-ondas e liofilização em diferentes temperaturas, potências e tempo para obter *snacks* de queijo desnatado. Os autores otimizaram a temperatura de secagem de modo que a atividade de água do produto ficasse entre 0,30 e 0,40, e avaliaram o produto obtido pelos três processos em relação à cor e a textura, além de análise sensorial dos produtos desidratados por micro-ondas. Como resultado eles descrevem que a temperatura desempenhou um papel relevante no

tempo de secagem e na dureza do produto, e entre os três processos estudados, a secagem por micro-ondas foi a mais rápida na remoção de água do queijo.

Martins *et al.* (2018), por sua vez, compararam a secagem em estufa, infravermelho e micro-ondas em três produtos lácteos de diferentes marcas, sendo estes a muçarela, o queijo cremoso e a bebida láctea. Neste estudo, apesar dos secadores não apresentarem diferença significativa entre eles, o micro-ondas também foi descrito como o método seguro e com resultados precisos, garantindo qualidade dos processos analíticos. O tempo de secagem foi descrito em 102 vezes mais rápida no micro-ondas do que na secagem tradicional em estufa podendo, portanto, ser o método de escolha para otimizar os processos de secagem em alimentos.

Já Koprualan *et al.* (2022) avaliaram os efeitos da secagem por micro-ondas, liofilização e micro-ondas + liofilização como tratamentos pré secagem para se obter *snacks* de queijo branco com teor reduzido de gordura. A combinação dos dois secadores resultou num produto com textura crocante aceitável, com menor diâmetro médio de poros, menor densidade aparente, melhores propriedades sensoriais e coloração mais uniforme, além de um menor teor de sal e maior teor de proteína quando comparado apenas a pré secagem por liofilização.

2.6.1 Secagem em micro-ondas

Um dos secadores mais citados na literatura e consideravelmente recente é o micro-ondas sendo que seu uso em aplicações industriais e em pesquisas se apresenta em expansão. Seu mecanismo de ação baseia-se no uso de ondas eletromagnéticas invisíveis a olhos humanos, variando numa frequência de 300 MHz a 300 GHz, aquecendo as porções do alimento que contenham água. Trata-se de um método promissor para secagem de alimentos com alto teor de umidade, além de ser rápido, eficiente e econômico (Chandrasekaran *et al.*, 2013; Rita *et al.*, 2017).

O processo da secagem por esta metodologia é dividido em três estágios. No primeiro, toda a energia é convertida em energia térmica dentro do material, aumentando a temperatura do produto que começa a perder umidade, inicialmente de forma lenta. Na segunda etapa, a temperatura se estabiliza e há vaporização de maiores taxas de umidade. Por fim, no terceiro estágio, a taxa de secagem começa a

ser reduzida e a temperatura local aumenta, porque a energia necessária para vaporizar a umidade torna-se menor que a energia emitida pelo micro-ondas, podendo, assim, gerar pontos de sobreaquecimento no produto (Chandrasekaran *et al.*, 2013; Gong *et al.*, 2025).

As micro-ondas possuem a característica de penetrar os materiais e os aquecerem volumetricamente, por toda sua extensão. O calor interno gerado pelo campo magnético produz um gradiente de pressão, o qual efetivamente retira a água do interior para a superfície das amostras. A secagem é rápida, uniforme e mais eficiente quando comparada a outros mecanismos convencionais por ar quente, além de permitir a combinação com outros métodos de desidratação, gerando produtos com maior qualidade quando comparados àqueles submetidos a um único secador (Zhang *et al.*, 2006).

Além de ser um processo consideravelmente rápido em comparação ao liofilizador, por exemplo, a secagem por micro-ondas resulta num produto de alta qualidade sensorial e pode ser aplicado para frutas, vegetais, grãos e mais recentemente para queijos em seus mais variados tipos. Um produto alternativo oriundo do processamento de queijo neste secador é o “*snack*”, considerado um petisco, podendo ser apresentado em diferentes formatos como cubos, *croutons*, esferas, entre outros, transmitindo uma imagem que remete ao natural em detrimento do queijo em pó, produto até então obtido desta secagem em pesquisas e em escala industrial (Monteiro *et al.*, 2018, 2016).

Simão *et al.* (2025), para obterem salgadinhos de queijo muçarela, utilizaram a secagem a vácuo por micro-ondas (MWVD), avaliando o impacto na qualidade das proteínas, aroma e textura. Foram investigados dois níveis de potência do micro-ondas (240W e 360W), resultando em densidades de potência nominais iniciais de $1,0 \text{ W g}^{-1}$ e $1,5 \text{ W g}^{-1}$, e a secagem foi concluída quando o teor de umidade das amostras estava abaixo de $0,02 \text{ g.g}^{-1}$ (base seca). Os autores descrevem um perfil de proteínas semelhante antes e depois da secagem, indicando nenhuma modificação estrutural. A secagem por MWVD foi descrita como uma técnica eficaz para a produção de salgadinhos de queijo muçarela, por ser um método rápido e que preservou a digestibilidade da proteína do queijo. Além disso, as amostras secas exibiram microestruturas expandidas com poros grandes, resultando em produtos

crocantes. A Figura 7 mostra, respectivamente, as amostras de queijo muçarela fresco, dos *snacks* desidratados por MWVD a $1,0 \text{ W g}^{-1}$ e $1,5 \text{ W g}^{-1}$ obtidos neste trabalho.



Fonte: Simão et al (2025).

Em um estudo semelhante, Gong *et al.* (2025) empregaram o secador por micro-ondas para produção de bolinhas de queijo muçarela parcialmente desnatada. Eles avaliaram os efeitos do nível de vácuo (2–14 kPa), entrada de potência específica de micro-ondas ($1\text{--}3 \text{ W}\cdot\text{g}^{-1}$) e geometria da amostra no comportamento de secagem e expansão de queijo muçarela parcialmente desnatado e de baixa umidade. Além disso, determinaram o teor de umidade, a atividade de água, a razão de área, a textura e a cor das bolinhas. De modo geral, esse estudo mostrou uma maneira de otimização de processos para secagem e expansão de queijo, principalmente para o mercado de salgadinhos de queijo seco.

2.6.2 Secagem em estufa de circulação forçada de ar

Muitos equipamentos utilizam as mesmas configurações da estufa de circulação, ou seja, têm como principal mecanismo da transferência de calor a convecção, mas recebem nomenclaturas diferentes. Neste tipo de secador o material trabalhado é submetido a uma corrente de ar aquecido e seco, proporcionando transferências de calor e massa predominantemente por convecção. A água do produto evapora, neste caso, na forma de vapor quente, pelo fato das diferenças de temperaturas e concentrações do produto e do ar de secagem resultarem de troca de calor e matéria, sendo que o calor transferido ao produto propicia energia necessária para a vaporização da água (Lewicki *et al.*, 2014; Mujumdar, 2014).

Pelo baixo custo de implementação e facilidade de operação, a secagem com ar quente em estufa é um dos métodos mais utilizados industrialmente. Porém, a depender do alimento a ser secado, demanda um longo tempo de exposição do produto ao calor, resultando em um extremo gasto de energia. Essas particularidades do equipamento podem impactar negativamente nas características físico-químicas, sensoriais e nutricionais dos produtos (Guiné *et al.*, 2018; Lewicki *et al.*, 2014).

Martins *et al.* (2018), em seu estudo comparativo, utilizaram a estufa, equipamentos de infravermelho e micro-ondas para secagem de muçarela e outros produtos lácteos. Os autores consideraram a estufa de fácil execução e de possibilidade de aplicabilidade em larga escala, apesar de levar a maiores tempos de secagem. O maior tempo de secagem foi da estufa, aproximadamente 8,5 h, a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Mesmo que o método produza resultados precisos, ele consome tempo e, portanto, muitas vezes é inviável em plantas de processamento que exigem resultados rápidos. Em comparação com o infravermelho, eles não relataram variações significativas entre os secadores na determinação de umidade e extrato seco.

2.6.3 Secagem em liofilizador

A secagem por liofilização acontece pelo processo de sublimação, em que a água é retirada passando de um estado sólido diretamente para o gasoso, sem passar pelo estado líquido. Este método vem sendo bastante utilizado na conservação de produtos perecíveis, sendo considerado o mais útil para secagem de alimentos termossensíveis. Utiliza de temperaturas abaixo do ponto de congelamento e pressões reduzidas (27 a 133 Pa), e resulta em produtos com baixa densidade, elevada porosidade e boa retenção de aroma e sabor. Um ponto negativo da liofilização é seu alto gasto energético por demandar um longo tempo de secagem (Rita *et al.*, 2017; Pellicer *et al.*, 2019).

Assim como na secagem por micro-ondas, a liofilização é dividida em etapas. Primeiro deve se realizar o resfriamento do material a baixas temperaturas, sendo que neste ponto ocorre congelamento da água e formação de cristais de gelo necessários para a eficiência do processo de transferência de massa e retirada da umidade. A segunda etapa consiste na liofilização de fato, em que em um primeiro

momento o solvente congelado é removido por sublimação. Depois disso, há o processo de dessorção, que é a retirada da água que não foi congelada e que ainda não é considerada água livre. Por este motivo esta etapa é mais lenta que a sublimação (Nowak; Jakubczyk, 2020; Rita *et al.*, 2017).

Apesar de seu alto custo de investimento, por resultar em um produto com maior conservação da forma original, com menos perda de sabor e proximidade com o estado não desidratado, a liofilização é o método de secagem mais citado em pesquisas microbiológicas e de preservação de queijos. Os queijos liofilizados são amplamente utilizados como ingredientes na indústria alimentar e são aqueles que proporcionam alguma facilidade de uso em comparação com os queijos convencionais. São facilmente misturados com outros componentes alimentares, podem ser armazenados por mais tempo e mantêm melhor o sabor e as propriedades funcionais (Bedir; Kuleasan, 2019; Silva *et al.*, 2021).

Silva *et al.* (2021) escolheram o liofilizador como secador para desidratar amostras de queijo tipo Petit Suisse, um tipo de queijo cremoso e suave, originalmente francês, semelhante a um queijo fresco, e depois reidratar o mesmo com extratos de mucilagem de certas folhas, por se tratar de um método que mantém algumas características iniciais do produto após a secagem. Os perfis de textura e viscosidade foram analisados nas amostras frescas e nas reidratadas após liofilização. Os autores descreveram que após a reidratação os valores da análise de textura diminuíram em comparação com os valores das amostras frescas, e ambas apresentaram comportamento pseudoplástico.

2.6.4 Secagem em *Air fryer*

Um método de secagem alternativo, com estudos recentes e descrito como uma alternativa mais saudável por não utilizar óleo em seu processo é por meio de *air frying* (fritura a ar). Basicamente, este mecanismo utiliza a fritura a ar, sendo este ar aquecido em uma câmara e com possibilidade de gotículas de óleos do produto utilizado se dispersarem. A fritura elétrica ao ar se popularizou com o uso doméstico em preparo de alimentos, principalmente por ser possível realizar o processo sem a utilização de óleos vegetais e, mesmo assim, obter uma qualidade semelhante ao produto frito em óleo ou gordura. Vale destacar que a fritura pode ser descrita como a

desidratação de um alimento através de uma fonte de transferência de calor, como o óleo, gordura, ar ou até mesmo o contato direto com o alimento (Schmiedeskamp *et al.*, 2022; Ngan *et al.*, 2023).

Quando comparada a fornos convencionais a desidratação por *air fryer* supera em velocidade de secagem pelo fato do ar quente proveniente de seu sistema de ventilação circular em alta velocidade e aquecer simultaneamente os alimentos. A temperatura e o tempo do processo podem ser ajustados de modo a preservar macronutrientes dos alimentos (Rani *et al.*, 2023; Schmiedeskamp *et al.*, 2022).

Na literatura existem estudos sobre a aplicação desse equipamento como método alternativo de secagem, porém percebe-se uma escassez do uso desse secador em produtos variados, impactando na consolidação e discussão dos resultados obtidos. Schmiedeskamp *et al.* (2022), por exemplo, ao realizarem o processamento térmico em cenoura por meio de alguns secadores, dentre eles a *air fryer*, relatam resultados inconclusivos sobre o impacto da fritura a ar no teor nutricional do alimento.

A secagem de queijo utilizando *air fryer* ainda é uma técnica pouco explorada. A maioria dos estudos disponíveis sobre desidratação de queijos concentra-se em métodos tradicionais, como secagem por ar quente, liofilização ou micro-ondas, os quais oferecem maior controle sobre variáveis como temperatura, fluxo de ar e umidade relativa. Por isso, há uma necessidade evidente de estudos sistematizados que investiguem o comportamento de diferentes tipos de queijo submetidos à secagem por *air fryer*, considerando variáveis como tempo, temperatura, formato do corte e tipo de queijo. Esses estudos podem contribuir não apenas para o avanço do conhecimento na área de processamento de alimentos, mas também para o desenvolvimento de novos produtos e tecnologias acessíveis ao consumidor.

3 METODOLOGIA

3.1 Material Utilizado

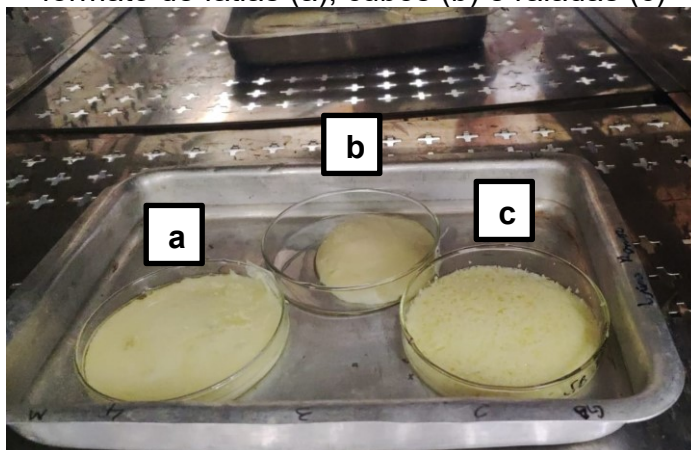
O queijo muçarela empregado como matéria-prima para a avaliação das diferentes das metodologias de secagem foi gentilmente fornecido por uma indústria de laticínios da cidade de Patos de Minas – MG na forma de peças.

3.2 Formato e armazenamento das amostras

De modo a definir se haveria algum impacto relevante de diferentes formatos da muçarela (cubos, fatias e raladas) durante a secagem, testes preliminares foram realizados com cerca de 30 g das mesmas, secando-as em micro-ondas (potências 70 e 700 W) e na estufa de circulação forçada (temperatura 100°C), de modo a observar se haveria alguma diferença significativa na umidade final entre os três formatos após o mesmo tempo de secagem (3 minutos na potência de 700 W, 30 min na potência de 70 W e cerca da 4 h na estufa). Como tal diferença de formato não gerou impacto considerável, optou-se então, por padronizar neste trabalho a secagem das amostras em cubos, devido a sua facilidade de manuseio durante a realização dos experimentos.

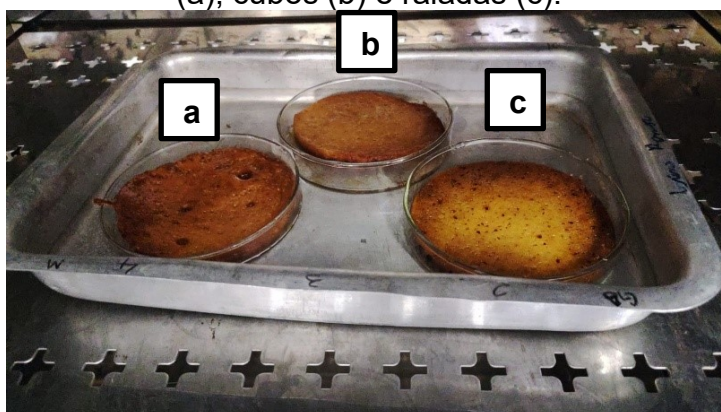
Na Figura 8 é possível observar na placa de petri (a), (b) e (c), respectivamente, as amostras cortadas em formato de fatias, cubos e raladas em processo de derretimento, na estufa de circulação forçada, e na Figura 9 as mesmas amostras já secas, com os três formatos se comportando de maneira idêntica, produzindo uma única massa uniforme após o derretimento inicial.

Figura 8 - Amostras em processo de derretimento na estufa cortadas inicialmente em formato de fatias (a), cubos (b) e raladas (c)



Fonte: A autora, 2024.

Figura 9 - Amostras secas após estufa cortadas inicialmente em formato de fatias (a), cubos (b) e raladas (c).



Fonte: A autora, 2024.

Assim, as peças de muçarela foram então processadas em um cortador de legumes multifuncional de lâmina, de modo a cortar as mesmas em cubos de 20x20x20 mm, como mostrado na Figura 10. Em seguida, foram acondicionadas em embalagens de polietileno e estocadas em congelador à temperatura por volta de -18°C . Conforme a necessidade de uso para realização dos experimentos, as amostras eram, então, retiradas do congelador e descongeladas à temperatura ambiente por período controlado e limitado de 1 hora, considerando o tempo necessário para processamento imediato do produto, minimizando riscos relacionados à multiplicação microbiana e preservando as características do alimento.

Figura 10 - Cortador de legumes.



Fonte: Reprodução da internet.

3.3 Metodologias de secagem

3.3.1 Secagem por micro-ondas

A secagem por micro-ondas foi realizada utilizando um aparelho convencional doméstico da marca Panasonic, modelo NN-ST254W com capacidade de 21 L e potência nominal de 700 W (Figura 11), instalado no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias, na Universidade Federal de Uberlândia, campus Patos de Minas.

Figura 11 - Micro-ondas convencional doméstico



Fonte: reprodução da internet.

Para realização dos experimentos, cerca de 100 g da amostra eram colocadas em um prato de vidro, sobre uma folha de teflon (PTFE) antiaderente, previamente pesados em balança semi-analítica. Os experimentos foram realizados em 10 potências diferentes (70 W (1), 140 W (2), 210 W (3), 280 W (4), 350 W (5), 420 W (6), 490 W (7), 560 W (8), 630 W (9) e 700 W (10), definidas no painel do equipamento. As amostras tiveram então sua massa monitorada periodicamente em balança, até que atingissem um valor de umidade correspondente a uma atividade de

água entre 0,300 e 0,500, ideal para armazenamento, conforme descrito por Chen; Patel (2008) e Sablani; Rahman (2008).

Após a finalização da secagem, em todos os secadores de aquecimento, caso a amostra não apresentasse atividade de água entre o valor definido como padrão para o estudo (0,300 a 0,500), o teste era descartado e iniciado nova análise.

3.3.2 Secagem por estufa

O processo de secagem na estufa (Figura 12) foi semelhante ao realizado em micro-ondas, utilizando uma estufa de convecção forçada (Ethik Technology, modelo 400-TD, Brasil). Uma bandeja junto a uma folha de teflon (PTFE) foi pesada, inicialmente vazia em balança semi-analítica, depois acrescida de 100 g da amostra e levada a estufa nas temperaturas de 90, 110, 130 e 150°C. Nas primeiras 3 horas de experimento as amostras foram pesadas a cada 15 min, e depois a cada 30 min até que se atingisse umidade equivalente a uma atividade de água entre 0,300 e 0,500.

Figura 12 - Estufa de circulação forçada



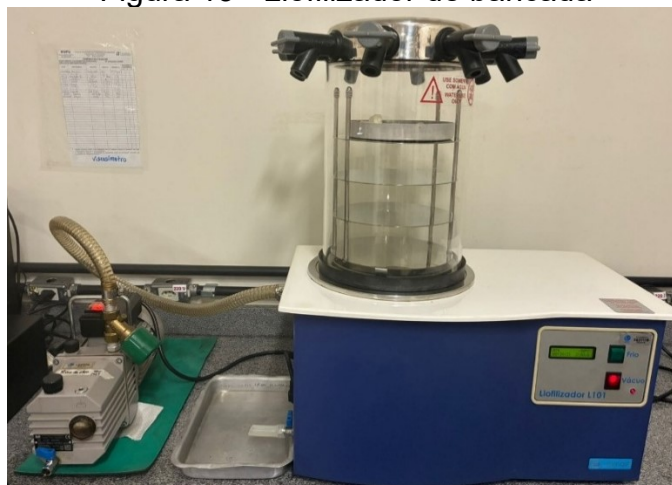
Fonte: reprodução da internet.

3.3.3 Secagem em liofilizador

O equipamento utilizado foi um liofilizador de bancada (modelo L-101, marca Liotop, Brasil) conforme Figura 13. As amostras (100 g) foram inicialmente congeladas em ultra-freezer (Indrel, IULT CRP 335D) a -56°C por cerca de 24 h. Após esse período, a muçarela foi acomodada em bandejas no interior da câmara de

secagem do liofilizador e iniciou-se a etapa de sublimação, na qual a bomba de vácuo foi acionada com uma pressão inferior a 0,015 mmHg por um período de 2h, 4h, 6h, 12h, 24 h, 48 h e 72 h.

Figura 13 - Liofilizador de bancada



Fonte: A autora, 2024.

3.3.4 Secagem em *air fryer*

As secagens das amostras foram realizadas em equipamento do tipo *air fryer* (Oster, Ethik Technology, Modelo 400-8D, 2012, Brasil) (Figura 14), no modo “assar” e “fritar sem óleo”, nas temperaturas de 90, 120, 150, 180 e 210°C. O processo de secagem foi semelhante ao realizado em micro-ondas e na estufa de circulação forçada. Uma bandeja junto a uma folha de teflon foi pesada, inicialmente, vazia em balança semi-analítica, depois acrescida de 100 g da amostra e levada ao equipamento em cada temperatura e modo estudado. Nos primeiros 20 min de experimento as amostras eram pesadas a cada 2 min, depois a cada 5 min, até 1 h de experimento, e por fim, a cada 8 min até que se atingisse atividade de água entre 0,300 e 0,500 para determinar para cada condição de temperatura a evolução temporal da umidade e da atividade de água.

Figura 14 - Air fryer



Fonte: reprodução da internet.

3.4 Análises físico-químicas das amostras antes e após secagem

Após a realização da secagem pelos diferentes métodos, as amostras foram armazenadas em sacos de polietileno e deixadas em freezer (-18°C) até o momento das análises. Para a amostras de muçarela *in natura* foi avaliada umidade, atividade de água e cor, e nos produtos obtidos em cada secador foram avaliados umidade, atividade de água, higroscopicidade, cor, textura, e por fim, a cinética de secagem em cada condição dos experimentos realizados. Os métodos analíticos são descritos a seguir.

3.4.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método de estufa à $105 \pm 3^\circ\text{C}$, por 24 h, de acordo com *Association of Official Analytical Chemist* – AOAC (1995). Para tal foi usada uma estufa convencional. A umidade das amostras, em base úmida, foi calculada de acordo com a Equação 1.

$$M = \frac{M_s - M_{ss}}{M_s} \times 100 \text{ (Equação 1)}$$

Em que M é a umidade do produto em base úmida (%), M_s é a massa de sólido úmido (sólidos e água) e M_{ss} é a massa de sólidos seco.

3.4.2 Atividade de água (a_w)

A mensuração da atividade da água (a_w) das amostras foi determinada por leitura direta em um medidor de atividade de água (Decagon Devices Inc., Aqualab Series 3TE, EUA) mostrado na Figura 15, no qual, por meio de um sistema de controle de temperatura integrado a um sensor infravermelho, são fornecidas as leituras de a_w das amostras em uma faixa de 0,000 a 1,000.

Figura 15 - Analisador de atividade de água



Fonte: A autora, 2024.

O medidor utiliza o método de ponto de orvalho. A amostra é inserida dentro de uma câmara hermética, e enquanto a temperatura é gradualmente reduzida, o aparelho monitora continuamente a pressão de vapor dentro da câmara. O ponto de orvalho é definido quando a temperatura atinge o ponto em que o vapor de água da amostra é condensado, sendo este evento ligado diretamente à atividade de água da amostra. A partir desta temperatura, o aparelho calcula a atividade de água e exibe o resultado no visor (Chen et al., 2021).

3.4.3 Higroscopicidade

A higroscopicidade das amostras de queijo foi obtida em metodologia adaptada conforme Cai e Corke (2000). Assim, foi colocado cerca de 1 g de amostra em uma cápsula de porcelana, e acondicionada em dessecador contendo solução saturada de cloreto de sódio (NaCl), com a umidade relativa de aproximadamente 70%, durante o período de sete dias à temperatura ambiente. Após esse período a massa da amostra foi aferida na balança analítica e calculada a higroscopicidade a partir da massa de água adsorvida. Essas análises foram realizadas em triplicata.

A higroscopicidade foi expressa em g de umidade adsorvida por 100 g de massa seca da amostra, conforme a Equação 2, sendo que nesta equação, a massa seca da amostra (M_{ss}) é calculada por meio de balanço de massa, conforme a Equação 3.

$$H = \frac{M_{ads}}{M_{ss}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

em que H representa a higroscopicidade (g de umidade adsorvida $\cdot 100^{-1}$ de massa seca); M_{ads} é a massa de umidade adsorvida (g) e M_{ss} é a massa de sólidos secos (g).

$$M_{ss} = [M_s - (M_s \times X_{bu})] \quad (\text{Equação 3})$$

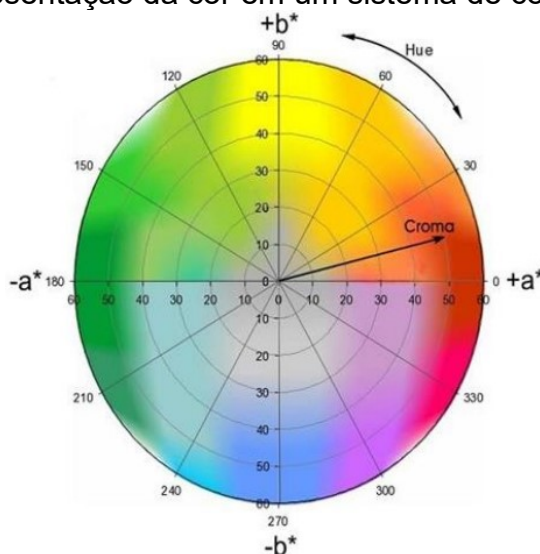
em que M_{ss} é a massa de sólidos secos (g), M_s é a massa de sólido úmido (massa de água + massa de sólido seco) (g) e X_{bu} é a umidade em base úmida (g água $\cdot$ g $^{-1}$ de massa total da amostra).

3.4.4 Cor

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE, 1976), estabelece que a cor de uma amostra é representada em um espaço tridimensional, onde cada parâmetro é identificado por um ponto específico nesse espaço (Figura 16). Este sistema de medição é definido, assim, pelas coordenadas L^* , a^* e b^* , onde:

- O eixo L^* representa a luminosidade, variando de 0 (preto) a 100 (branco);
- O eixo a^* indica uma escala de tonalidades que vai de vermelho (+a) a verde (-a);
- O eixo b^* cobre uma escala de tonalidades que vai de amarelo (+b) a azul (b).

Figura 16 - Representação da cor em um sistema de coordenadas do CIE



Fonte: Adaptado de Minolta, 1998.

Desse modo, para a análise de cor das amostras utilizou-se um colorímetro digital modelo Delta Vista 450G (Figura 17) que fornece resultados em $L^*a^*b^*$ C^*h^* G (Brilho 60°), entre outros índices.

Figura 17 - Colorímetro digital



Fonte: A autora, 2026.

Importante ressaltar que, para leitura no equipamento, foi necessário previamente triturar as amostras em um triturador modelo IKA A11 basic (Figura 18).

Figura 18 - Triturador modelo IKA A11 basic



Fonte: A autora, 2026.

Assim, partir dos valores de L^* , a^* e b^* obtidos no colorímetro digital, foram calculados os parâmetros: croma de saturação de cor (C^*), que representa a saturação ou intensidade de cor; e o ângulo de tonalidade cromática (ângulo hue; H°), onde o 0° , representa vermelho puro; o 90° , o amarelo puro; o 180° o verde puro e o 270° , o azul puro. Também se calculou o valor que define a diferença total da cor da amostra em relação a amostra padrão *in natura* padrão (ΔE). Tais parâmetros foram definidos de acordo com as Equações 4 a 6, respectivamente, em que L^1 , a^1 e b^1 é o valor CIE L^* da cor de referência da amostra *in natura* (CORDEIRO *et al.*, 2015).

$$C = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$H^0 = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (\text{Equação 5})$$

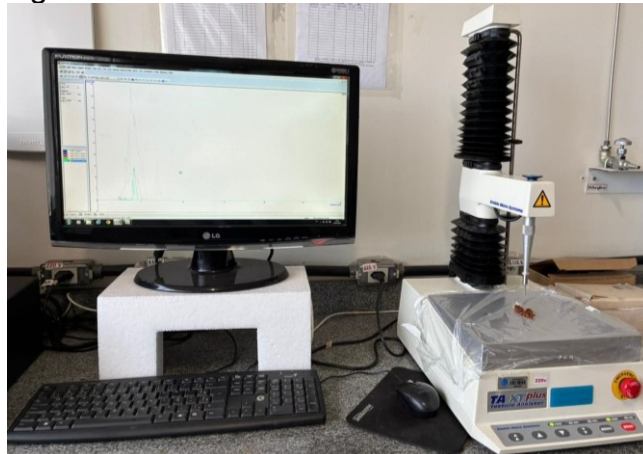
$$\Delta E = \sqrt{(L^1 - L^*)^2 + (a^1 - a^*)^2 + (b^1 - b^*)^2} \quad (\text{Equação 6})$$

3.4.5 Textura

A textura, representada pela da resistência (N) que as amostras ofereciam ao serem penetradas em 70% de sua altura original, foi determinada por um teste de penetração (*puncture test*), utilizando o texturômetro universal TAXT Plus (Stable Micro System, Surrey, UK) (Figura 19), e uma probe cilíndrica de aço inox com 2 mm (Figura 20). O equipamento foi calibrado com um peso de 2000 g e a probe, já fixada, calibrada com uma distância de retorno de 30 mm, velocidade de retorno de 10 mm/s

e força e contato de 100 g. Outros parâmetros utilizados foram: velocidade de teste (0,50 mm/s) e uma tensão de 70% da sua altura inicial.

Figura 19 - Análise de dureza no texturômetro



Fonte: A autora, 2026.

Figura 20 - Pobre utilizada no texturômetro



Fonte: A autora, 2026.

Para realizar os testes, as amostras foram acondicionadas no suporte de aço inoxidável do equipamento e perfuradas pela probe. Com isso, a força expressa em Newton (N), foi determinada diretamente através das curvas de tensão em função do tempo, estabelecendo a força máxima necessária para que as amostras sejam perfuradas. Os dados foram obtidos pelo Software “Texture Expert for Windows” - versão 1.20 (Stable Micro Systems).

A partir dos dados obtidos e com os valores utilizados para tensão (70%) foi determinada a deformação relativa (%) em cada tratamento gerando o gráfico de força (N) x deformação relativa (%) para discussão dos resultados.

3.4.6 Cinética de Secagem

Os dados de teor de umidade obtidos em diferentes tempos de secagem foram utilizados para representar a cinética de remoção de água das amostras nos

diferentes secadores e condições experimentais avaliadas. Para a análise e comparação das curvas de secagem, os valores de teor de umidade foram expressos em termos do adimensional de umidade (MR), calculado de acordo com a Equação 7:

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde MR é o adimensional de umidade, M é a umidade em um tempo qualquer, M_0 é a umidade inicial e M_{eq} é a umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio foi obtida a partir do cálculo da umidade registrada em cada ponto de secagem pela umidade inicial da amostra.

Foram ajustados aos dados experimentais de MR em função do tempo diferentes modelos matemáticos descritos na literatura. A adequação dos modelos foi avaliada com base em parâmetros estatísticos, como o coeficiente de determinação (R^2), sendo que dentre os modelos avaliados, a equação proposta por Midilli et al. (2002), descrita a seguir (Equação 8), apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais e, portanto, foi selecionada para representar a cinética de secagem.

$$MR = A \cdot \exp(-kt^n) + Bt \quad (\text{Equação 8})$$

Em que A, k, n e B são parâmetros do modelo e t corresponde ao tempo de secagem.

Os parâmetros do modelo foram estimados por regressão não linear dos dados experimentais de MR em função do tempo, considerando as diferentes condições experimentais avaliadas. O tratamento estatístico dos dados foi realizado utilizando o software STATISTICA®, versão 7.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Amostra *in natura*

A amostra *in natura* apresentou umidade de 43,0 % e atividade de água em torno de 0,985. Após a realização de testes preliminares de secagem, verificou-se que uma a_w entre 0,300 e 0,500, adequada para armazenamento e controle microbiológico (Chen; Patel, 2008; Sablani; Rahman, 2008) seria obtida se o material atingisse um valor de umidade inferior à 5%. Devido a isso, padronizou-se que o processo de secagem a ser realizados nos diversos secadores aconteceria até que tal umidade e faixa de atividade de água fossem atingidas.

Com relação a cor da amostra *in natura*, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2. Semelhante ao relatado por Gulati *et al.* (2018), a muçarela *in natura* estudada apresentou coloração branco-amarelada, com destaque para o ângulo de tonalidade cromática (h°) de quase 90° , descrito como amarelo puro, além do parâmetro L^* , que representa a luminosidade da amostra, próximo de 100 (branco).

Tabela 2 - Resultados dos parâmetros de cor para a amostra *in natura*

PARÂMETRO	IN NATURA
L	97,64
a	0,39
b	24,57
C	24,57
H	89,09

Fonte: Dados da pesquisa.

4.2 Secagem em micro-ondas

4.2.1 Considerações gerais, umidade e atividade de água

Na Figura 21 é possível observar os efeitos das micro-ondas sobre a muçarela, incluindo o processo de fusão parcial e perda da estrutura original do queijo, como exemplificado na potência de 70 W, por 30 minutos durante testes preliminares, além do aspecto após a secagem neste método. Mesmo que a secagem por micro-ondas seja caracterizada por um aquecimento uniforme (Chandrasekaran *et al.*, 2013;

Zhang et al., 2006) no material utilizado percebeu-se o derretimento da amostra iniciando em suas extremidades e, na sequência, a secagem propriamente dita, levando a um escurecimento.

Figura 21 - Processo de secagem do queijo muçarela em micro-ondas à potência de 70 W



Fonte: A autora, 2024.

Os resultados de umidade, atividade de água e tempo de processo obtidos após a secagem em micro-ondas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da secagem de muçarela em micro-ondas.

POTÊNCIA (W)	TEMPO (min)	UMIDADE (%)	ATIVIDADE DE ÁGUA
70	77	4,19 ± 0,59	0,416
140	30	5,30 ± 1,00	0,524
210	23	5,25 ± 0,46	0,387
280	17	2,48 ± 0,13	0,409
350	11	5,71 ± 0,22	0,325
420	10	4,80 ± 0,51	0,325
490	9	3,43 ± 0,38	0,316
560	7	2,13 ± 0,78	0,421
630	6	3,09 ± 0,52	0,427
700	6	1,47 ± 0,54	0,357

Fonte: Dados da pesquisa.

É possível observar como os diferentes níveis de potência influenciaram o tempo de processamento, a umidade final e a atividade de água do produto. Observou-se uma tendência de redução do tempo necessário para a secagem com o aumento da potência, assim como relatado por Koprualan et al. (2022) ao estudarem os efeitos da pré-secagem por micro-ondas, liofilização e micro-ondas + liofilização na produção de *snacks* de queijo branco com teor reduzido de gordura.

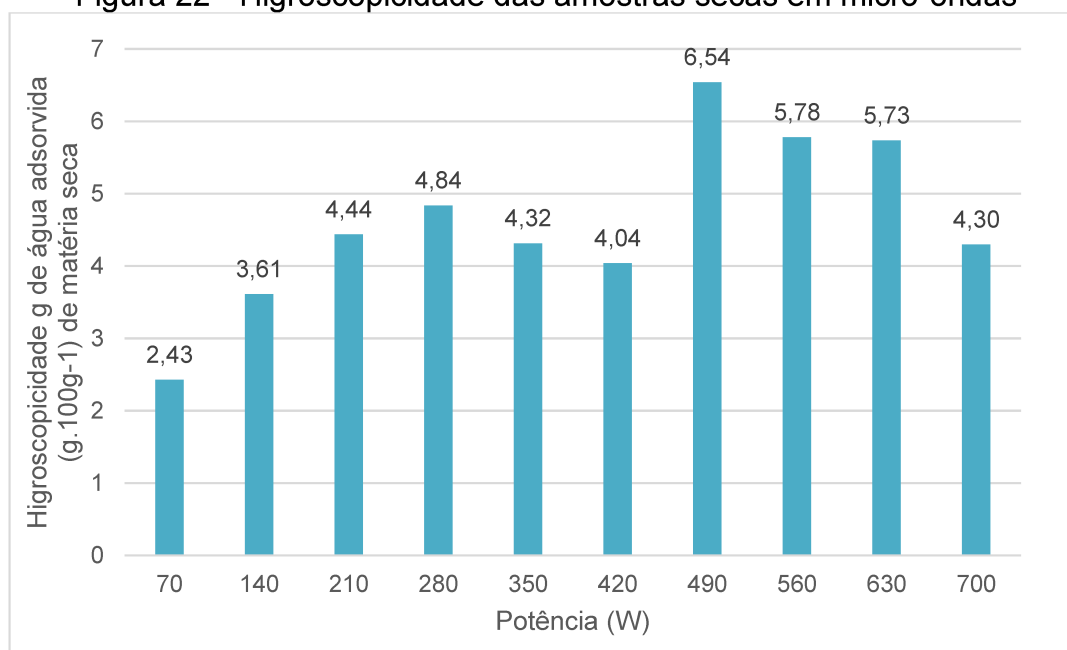
De modo geral, os resultados obtidos no presente estudo demonstraram ser possível realizar a secagem da muçarela de forma satisfatória em micro-ondas, obtendo-se valores de atividade de água entre 0,300 e 0,500, e teor de umidade entre 1,0 e 5,3 % em tempos de processo entre 77 e 6 min, confirmando a alta eficiência energética e tempos reduzidos dessa metodologia.

Gong et al. (2025), ao utilizarem secagem por micro-ondas à vácuo na produção de bolinhas de queijo muçarela parcialmente desnatada, relataram amostras submetidas a diferentes pressões apresentando teor de umidade final entre 5 e 9% (base úmida) e atividade de água variando de 0,300 a 0,600 após 50 min de processamento, resultados próximos dos obtidos neste estudo. Além disso, eles observaram um leve aumento no teor de umidade final com o aumento da pressão: as amostras secas à 14 kPa apresentaram um teor de umidade final significativamente maior em comparação com as secas a 2 kPa.

4.2.2 Higroscopicidade

Os resultados obtidos para a higroscopicidade das amostras secas nas diferentes potências do micro-ondas são apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Higroscopicidade das amostras secas em micro-ondas



Fonte: Dados da pesquisa.

A higroscopicidade está relacionada diretamente à capacidade de adsorção de água das amostras após a desidratação, além dos impactos na estabilidade dos materiais secos. Esse parâmetro pode estar intimamente ligado a escolha do tipo de embalagem do produto seco e as alterações susceptíveis a este produto durante seu armazenamento, por exemplo (Seerangurayar *et al.*, 2017).

Gea (2003) traz uma classificação para lácteos segundo os parâmetros obtidos para higroscopicidade de forma que aqueles ditos como não higroscópicos apresentam valor inferior a 10%, ligeiramente higroscópicos quando os valores estavam entre 10,1 e 15%, higroscópicos para valores entre 15,1 e 20%, muito higroscópicos para valores entre 20,1 e 25%, e extremamente higroscópicos para pós com valores superiores a 25%. Assim, utilizando-se dessa classificação, as amostras de muçarela secas no micro-ondas são classificadas como não higroscópicas.

Em relação à higroscopicidade, os valores obtidos oscilaram entre 2,43 g/100g e 6,54 g/100g. O maior valor foi registrado na potência de 490 W, indicando que nessa condição a estrutura do queijo seco pode ter favorecido uma maior adsorção de umidade do ambiente.

De forma geral, os dados evidenciam que em potências mais elevadas, como de 560 e 700 W, apesar de promoverem uma secagem caracterizada pela obtenção de menores teores de umidade em menor tempo, podem impactar na higroscopicidade do produto obtido, levando ao seu aumento e fazendo com que esse parâmetro também deva ser considerado na escolha das condições ideais de processamento.

4.2.3 Cor

Os resultados obtidos para cor nas dez potências avaliadas em micro-ondas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de cor das amostras secas no micro-ondas

POTÊNCIA (W)/PARÂMETRO	70	140	210	280	350	420	490	560	630	700
L*	23,54	29,83	29,41	22,53	26,52	34,89	27,70	26,69	22,77	23,75
a*	21,04	24,38	24,53	20,60	20,42	24,13	23,13	23,70	24,25	26,37
b*	30,39	41,75	40,25	25,12	23,73	44,05	33,64	34,50	33,62	37,62
C*	36,96	48,35	47,14	32,49	31,31	53,53	40,82	41,86	41,45	45,94
h°	55,30	59,72	58,64	50,65	49,29	57,68	55,49	55,51	54,20	54,97
ΔE	77,14	73,95	74,05	77,78	73,89	77,69	74,10	75,34	79,10	79,40

Fonte: Dados da pesquisa.

O parâmetro L*, que representa a luminosidade da amostra (0 = preto, 100 = branco), apresentou variações entre 22,53 (potência 280 W) e 34,89 (potência 420 W). Observa-se que as amostras submetidas às potências 630, 280 e 70 W mostraram os menores valores, sugerindo escurecimento da amostra, possivelmente relacionado à maior degradação térmica, possivelmente pelo tempo prolongado de exposição descrito nas potências menores (280 e 70 W) e pelo maior aquecimento empregado na potência maior (630 W), ou reações de escurecimento não enzimático.

Quanto ao parâmetro a*, que indica a variação da cor entre verde (valores negativos) e vermelho (valores positivos), os resultados ficaram todos em valores positivos, variando de 20,42 (potência 350 W) a 26,37 (potência 700 W), indicando predominância de tonalidades avermelhadas nas amostras. A potência mais alta, de 700 W, resultou em maior valor de a*, sugerindo um aumento na intensidade do vermelho com o aumento da potência — o que pode ser associado a alterações químicas nos pigmentos naturais do queijo ou formação de compostos de coloração avermelhada durante o aquecimento, conforme explicado por Zou *et al.* (2013).

O parâmetro b*, que indica a intensidade do amarelo (positivo) ou azul (negativo), variou entre 23,73 (potência 350 W) e 44,05 (potência 420 W). Embora, os valores de “b” terem sido consistentemente positivos em todas as amostras, indicando a presença da componente amarela, o valor de b* no *in natura* (24,57) foi inferior ao observado na maioria das condições de secagem.

Simão *et al.* (2025), secando queijo muçarela em micro-ondas à vácuo para produzir *snacks*, obtiveram resultado semelhante em suas amostras secas apresentando valores de a^* significativamente maiores do que no queijo fresco, e associaram também tal resultado ao aumento da temperatura durante o processo de secagem. Com relação ao parâmetro b^* , segundo os autores, ocorre degradação de β -caroteno durante o processo de secagem devido ao aquecimento, o que colabora para alteração dos valores de b^* , ou seja, amarelamento das amostras de queijo seco.

Gong e Moraru (2025), ao utilizarem muçarela parcialmente desnatada com baixo teor de umidade e queijo cheddar suave para avaliarem mudanças que ocorrem durante a secagem por micro-ondas a vácuo, relataram para a muçarela apenas um L^* maior nas pressões de 5,6 e 9,6 kPa, e justificaram tal alteração devido ao alto nível de expansão das amostras ocorrido nessas pressões. Já para o queijo cheddar, foi relatado um aumento de a^* (vermelhidão) ao longo do tempo para todas as pressões, indicativo de escurecimento de Maillard. Os autores associaram, a reação de Maillard no cheddar à maior disponibilidade de resíduos de aminoácidos pelo maior teor de nitrogênio não proteico neste queijo, já que os perfis de temperatura foram semelhantes para ambos os tipos de queijo estudados.

O parâmetro C^* representa a intensidade ou saturação da cor. Valores mais elevados indicam cores mais vivas e intensas, enquanto valores menores sugerem aparência mais opaca. Observa-se que os valores de C^* variaram de aproximadamente 31,31 a 53,53. A maior cromaticidade ocorreu na potência de 420 W (53,53), indicando que nessa condição intermediária a muçarela apresentou coloração mais intensa e saturada. Em contrapartida, na potência de 280 W (32,49) apresentou o menor valor, sugerindo uma aparência menos intensa.

O parâmetro h° (Hue ou ângulo de tonalidade) indica a tonalidade predominante da cor. Em alimentos, valores próximos de 90° tendem ao amarelo, enquanto valores menores aproximam-se do vermelho. Na tabela, os valores de h° mostraram predominância de tonalidades amareladas características da muçarela desidratada. A potência de 140 W apresentou o maior valor de h° (59,72), sugerindo coloração mais amarelada. Já em 280 W, ocorreu o menor valor (50,65).

Quanto a classificação do valor de ΔE responsável por expressar a diferença total de cor em relação a uma amostra padrão ou controle, Romano *et al.*

(2020) classificam os valores menores que 1,0 sendo aqueles com diferenças de cor não perceptíveis aos olhos humanos; valores entre 1 e 2 perceptíveis apenas com uma observação atenta; valores de 2 a 10 correspondem a diferenças de cor facilmente perceptíveis visualmente; diferenças entre 11 e 49 indicam diferenças mais significativas de cores; valores entre 50 e 99 mostram que as cores são mais opostas do que semelhantes; e um valor de 100 indica que as cores são exatamente opostas. De modo geral, quanto maior o ΔE , maior a alteração perceptível da cor.

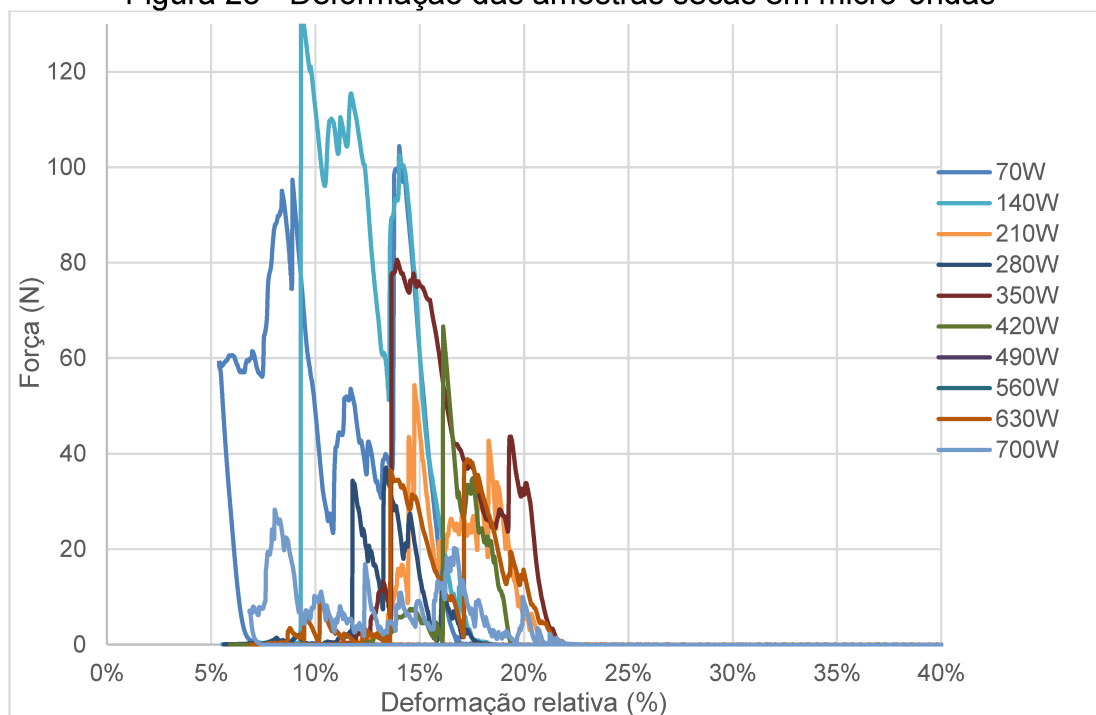
Para as amostras secas no micro-ondas, os resultados mostraram valores relativamente altos em todas as potências evidenciando que o processo de desidratação resultou em um produto cromaticamente muito distinto do original. O maior ΔE foi observado em 630 W (79,10), indicando a maior alteração visual da cor, enquanto o menor ocorreu em 350 W (73,89), sugerindo menor diferença em relação ao padrão em comparação com as demais potências, mas ainda representa uma diferença de cor muito elevada em comparação com a amostra *in natura*.

Em síntese, os resultados indicam que o processamento por micro-ondas promoveu alterações nos parâmetros colorimétricos do queijo muçarela, com diferenças entre as potências avaliadas. Observou-se redução da luminosidade (L^*) e alterações nos parâmetros a^* , b^* , C^* e h° em relação à amostra *in natura*, evidenciando mudanças na cor decorrentes do processamento. Embora as maiores potências tenham proporcionado menores tempos de secagem, os parâmetros de cor não apresentaram tendência monotônica com o aumento da potência. Assim, a escolha da condição de processamento deve considerar conjuntamente a redução do tempo de secagem e as alterações de cor observadas no produto.

4.2.4 Textura - Análise de deformação

A Figura 23 apresenta as curvas de força em função da deformação relativa obtidas por ensaio de perfuração das amostras de muçarela submetidas à secagem por micro-ondas nos diferentes níveis de potência (70 a 700 W). Observa-se que o comportamento mecânico das amostras foi influenciado pelas condições de secagem, evidenciando alterações na resistência estrutural do produto em função da potência aplicada.

Figura 23 - Deformação das amostras secas em micro-ondas



Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, todas as amostras apresentaram um aumento progressivo da força com o avanço da deformação até atingir um valor máximo, correspondente à resistência à ruptura da estrutura. As amostras secas em menores potências, especialmente a 140 W, apresentaram os maiores valores de força máxima, atingindo aproximadamente 130 N. Em contrapartida, as amostras submetidas às maiores potências tenderam a apresentar menores valores de força máxima, indicando redução da resistência mecânica e aumento da fragilidade estrutural.

A deformação relativa ocorreu predominantemente entre 8% e 20%, demonstrando que as amostras apresentaram comportamento característico de materiais rígidos, com limitada capacidade de deformação antes da falha estrutural. Além disso, observou-se que algumas amostras processadas em potências intermediárias exibiram maior dispersão nos valores de força e deformação, o que pode estar relacionado à heterogeneidade do aquecimento por micro-ondas, à distribuição não uniforme da umidade residual e às diferenças microestruturais geradas durante a secagem.

A faixa relativamente estreita de deformação na qual ocorreram os picos de força sugere que as amostras apresentaram baixa capacidade de deformação antes da ruptura. Em outras palavras, após um curto período de deformação, a estrutura tende a falhar rapidamente, comportamento típico de materiais com reduzido teor de água. A água atua como plastificante natural nos alimentos, aumentando a mobilidade molecular e a flexibilidade estrutural. Dessa forma, a remoção da umidade durante a secagem favorece o aumento da rigidez e da fragilidade do material (Arimi *et al.*, 2010; Simão *et al.*, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se à presença de múltiplos picos e quedas abruptas observados em diversas curvas, bem como observado por Moraes *et al.* (2022) ao realizar teste de perfuração em bananas desidratadas relatando alta correlação com a crocância sensorial com os números de picos acústicos. Como dito pelos autores, esse padrão é característico de materiais frágeis e heterogêneos, nos quais a ruptura não ocorre em um único evento, mas sim por meio de sucessivas fraturas localizadas. Em produtos alimentícios desidratados, esse comportamento está frequentemente associado ao desenvolvimento de textura crocante ou quebradiça, uma característica desejável em determinados tipos de *snacks* obtidos por secagem.

Os resultados indicaram que a potência de secagem exerce influência direta sobre as propriedades de textura do queijo desidratado, ao contrário de Simão *et al.* (2025) que não observaram influência significativa da potência do micro-ondas nas propriedades mecânicas dos *snacks* de queijo. Foi observado o desenvolvimento de estruturas mecanicamente mais resistentes em potências mais baixas, enquanto potências mais elevadas promoveram a formação de matrizes mais frágeis, provavelmente em razão da rápida evaporação da água e da consequente geração de poros, microcanais e tensões internas.

4.2.5 Cinética de secagem

Os parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002), estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais nas diferentes potências de micro-ondas, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli *et al.* (2002) na secagem por micro-ondas

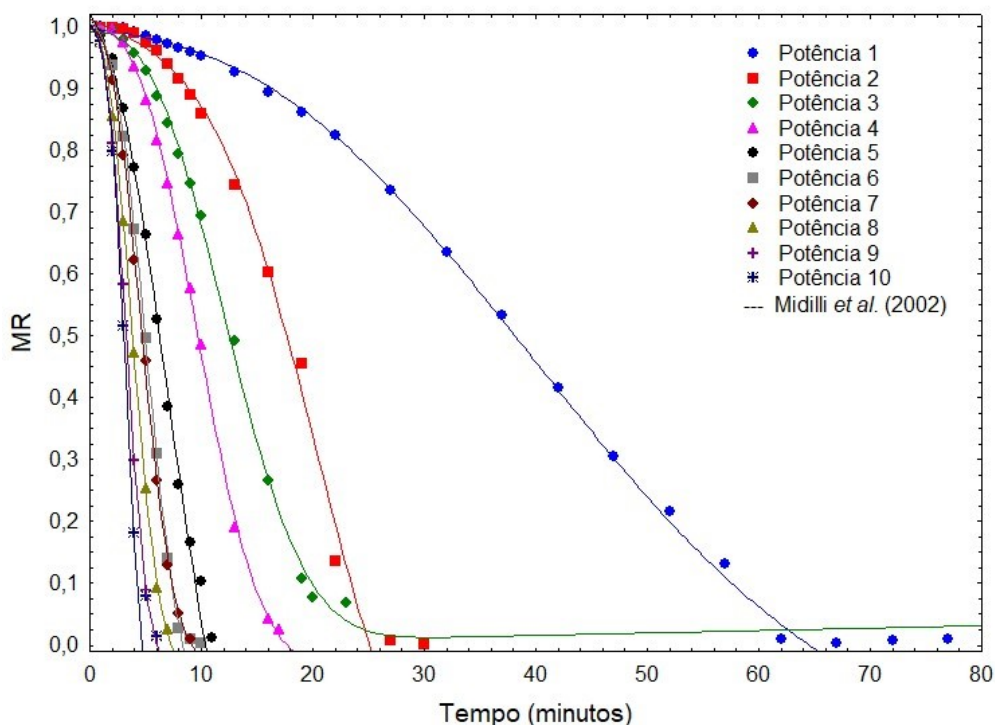
EXPERIMENTOS	k	n	A	B	R ²
POT 1 (70 W)	0,000062	2,493091	0,996632	-0,00206	0,9995
POT 2 (140 W)	0,000015	3,586174	1,013138	-0,00844	0,9986
POT 3 (210 W)	0,000855	2,651128	0,991778	0,000397	0,9991
POT 4 (280 W)	0,001331	2,731037	1,001351	-0,00187	0,9997
POT 5 (350 W)	0,006936	2,246738	1,020407	-0,02611	0,9975
POT 6 (420 W)	0,008054	2,689923	1,004956	-0,01084	0,9999
POT 7 (490 W)	0,013349	2,528725	0,998432	-0,00306	0,9998
POT 8 (560 W)	0,022714	2,501641	0,997779	-0,00498	0,9998
POT 9 (630 W)	0,027685	2,686316	0,998813	-0,00497	0,9998
POT 10 (700 W)	0,016896	3,118207	1,006563	-0,02807	0,9996

Fonte: Dados da pesquisa.

Os parâmetros estimados para o modelo de Midilli *et al.* (2002) apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2 entre 0,9975 e 0,9999), evidenciando excelente ajuste aos dados experimentais em todas as condições de secagem. Esses resultados indicaram que o modelo foi capaz de representar com elevada precisão a cinética de secagem da muçarela submetida às diferentes potências de micro-ondas, corroborando sua ampla utilização na modelagem da secagem de alimentos. A potência 6 (420 W) foi a que apresentou o melhor ajuste estatístico ($R^2 = 0,9999$), embora todas as potências tenham apresentado excelente concordância entre os dados experimentais e os valores estimados.

A Figura 24 apresenta o gráfico de adimensional de umidade (MR) em função do tempo para amostras de muçarela submetidas à secagem por micro-ondas nos dez níveis de potência assim como sua adequabilidade ao modelo estatístico.

Figura 24 -Cinética de secagem da secagem de muçarela por micro-ondas



Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que o aumento da potência do micro-ondas, a razão de umidade diminuiu mais rapidamente, resultando em menores tempos de secagem. A Potência 1 (70 W) apresentou a menor taxa de remoção de água, necessitando aproximadamente 67 min para atingir MR próxima de zero. O que corresponde à aproximação da umidade de equilíbrio adotada no cálculo de MR. De modo geral, o aumento da potência esteve associado à redução do tempo necessário para a secagem, chegando a menos de 10 min nas mais elevadas. Esse comportamento é esperado porque o aquecimento por micro-ondas ocorre de forma volumétrica, ou seja, a energia eletromagnética é convertida em calor diretamente no interior do alimento. O aumento da potência eleva a taxa de geração de calor, aumentando o gradiente de pressão de vapor no interior da amostra e acelerando a migração da água para a superfície, onde ocorre a evaporação (Chandrasekaran *et al.*, 2013).

Outro aspecto importante é o formato das curvas. Nas menores potências observa-se uma redução gradual da MR, indicando menor taxa de secagem durante praticamente todo o processo; nas intermediárias a queda da MR torna-se mais acentuada, reduzindo o tempo necessário para atingir o equilíbrio; e nas maiores

potências verifica-se uma queda muito rápida da razão de umidade logo nos primeiros minutos, indicando maior velocidade de remoção de água.

Em coerência com as curvas apresentadas no gráfico, nas quais maiores potências conduzem à redução expressiva do tempo para atingir baixos valores de MR, Gong *et al.* (2025) demonstraram que o aumento da potência específica reduz significativamente o tempo de secagem da muçarela com baixa umidade durante a secagem por micro-ondas a vácuo. Os autores verificaram que a potência foi o parâmetro que exerceu maior influência sobre a velocidade de secagem, enquanto o nível de vácuo influenciou principalmente a expansão do produto.

Simão *et al.* (2025), avaliando *snacks* de muçarela obtidos por secagem em micro-ondas sob vácuo, verificaram que maiores densidades de potência diminuem o tempo de secagem sem comprometer a digestibilidade proteica, além de produzirem produtos com baixa atividade de água e textura crocante. Embora o foco do trabalho seja a qualidade final do produto, a tendência observada na cinética é compatível com o comportamento mostrado na Figura 24. Chudy *et al.* (2019), estudando *snacks* de queijo produzidos por secagem em micro-ondas sob vácuo, também relataram que o rápido aquecimento volumétrico reduz substancialmente o tempo de processamento quando comparado aos métodos convencionais, favorecendo a obtenção de produtos crocantes.

4.3 Secagem em estufa de circulação forçada

4.3.1 Considerações gerais, umidade e atividade de água

O aspecto das amostras secas em estufa está apresentado na Figura 25. Assim como no micro-ondas, pôde-se observar que as bordas ficaram mais escuras do que região central da amostra, característica desse processo de secagem.

Figura 25 - Amostra seca em estufa



Fonte: A autora, 2024.

Os resultados de umidade e atividade de água do queijo muçarela secos na estufa de circulação forçada, nas temperaturas de 90, 110, 130 e 150°C e o tempo de processo em cada uma das bateladas são apresentados na Tabela 6. Como pode-se observar, todos os experimentos atingiram um valor de atividade de água dentro da faixa ideal, entre 0,325 e 0,431.

Tabela 6 - Resultados da secagem em estufa

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)	UMIDADE (%)	ATIVIDADE DE ÁGUA
90	315	8,43 ±1,58	0,431
110	165	5,62 ±0,53	0,396
130	85	4,90 ±0,84	0,312
150	45	3,28 ±0,07	0,325

Fonte: Dados da pesquisa.

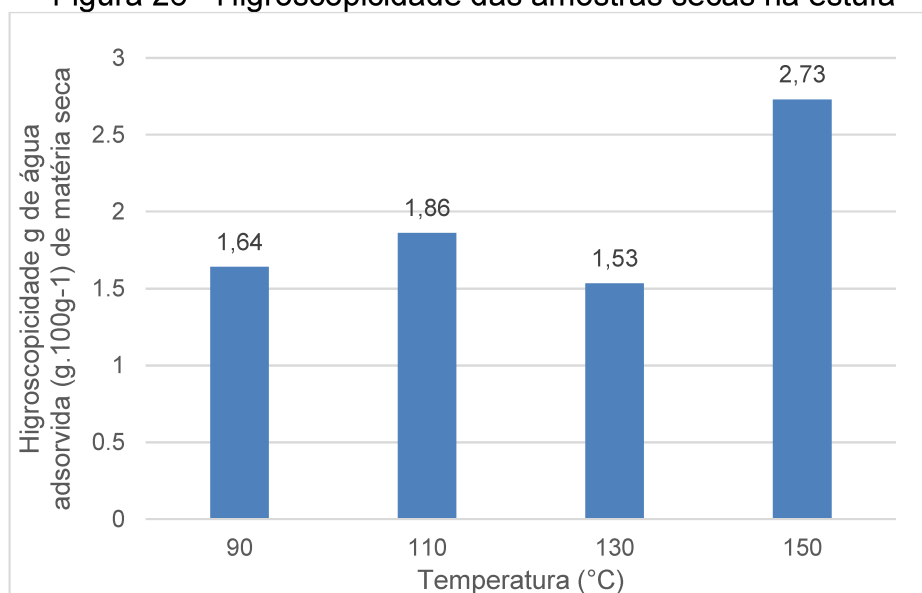
Os dados indicaram, assim como esperado uma relação inversa entre a temperatura aplicada e o tempo necessário para a secagem: à medida que a temperatura aumentou, o tempo de processamento diminuiu consideravelmente. Por exemplo, a secagem a 90°C exigiu 315 min para atingir uma umidade final de 8,43%, enquanto a 150°C o mesmo processo foi concluído em apenas 45 min (14,3% do tempo), com uma umidade residual de 3,28%. Em conformidade, Rita *et al.* (2017) descrevem que o tempo de secagem aumentou com a diminuição da temperatura. Ao estudarem a desidratação de queijo desnatado por diferentes métodos para desenvolvimento de *snacks*, os autores relatam que um aumento de temperatura de 43 para 52 °C (diferença de 9 °C) resultou em uma redução de cerca de 27% do teor de água na amostra em 5 horas de secagem.

Mesmo constatando uma diminuição de tempo quando a temperatura experimental aumenta, quando comparado a outros métodos de secagem a estufa segue sendo um dos processos de maior demanda de tempo de execução. Martins *et al.* (2018), ao compararem a metodologia de secagem em alguns equipamentos para diferentes produtos lácteos, dentre eles a muçarela, descrevem a estufa como o método mais demorado, exigindo, por exemplo, aproximadamente 8,5 h para secar a uma temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$. Por fim, os autores concluem que a estufa, apesar de ser um método preciso, é lento e inviável quando se precisa de resultados rápidos em análises laboratoriais de processos industriais.

4.3.2 Higroscopicidade

A higroscopicidade da muçarela desidratada em estufa de convecção forçada apresentou comportamento dependente das condições de secagem empregadas, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Higroscopicidade das amostras secas na estufa



Fonte: Dados da pesquisa.

Ozgen (2015) e Rita *et al.* (2017) descrevem que uma rápida perda de água geralmente é observada no início do processo de secagem devido à rápida evaporação da água livre do produto, seguida de uma estabilidade e remoção de água mais gradual, o que pode justificar a preservação parcial e a integridade estrutural da matriz proteica, reduzindo a exposição de grupos hidrofílicos, além de explicar valores

menores de higroscopicidade à temperaturas como a de 90°C, devido ao longo tempo de secagem nessa temperatura (315 min).

Por outro lado, na temperatura de 150°C, observou-se um aumento expressivo da higroscopicidade, atingindo 2,73 g 100 g⁻¹, cerca de 66,5% maior que o obtido à 90°C. Esse comportamento indica que temperaturas muito elevadas podem causar alterações estruturais mais intensas na matriz da muçarela, incluindo desnaturação proteica e formação de microfissuras. Além disso, a rápida remoção de água pode gerar tensões internas na estrutura do material, favorecendo maior capacidade posterior de adsorção de umidade do ambiente (Botelho *et al.*, 2015). Destaca-se ainda que a condição de 150 °C apresentou o menor teor de umidade residual entre as condições avaliadas, concomitantemente ao maior valor de higroscopicidade, o que reforça a importância de considerar conjuntamente esses parâmetros na avaliação do comportamento do produto seco.

Nesse sentido, entre as condições avaliadas, a secagem a 130 °C por 85 min apresentou o comportamento mais adequado para conservação do produto, indicando melhor equilíbrio entre remoção de água e estabilidade estrutural da matriz desidratada, dado que nela foi obtido o menor valor de higroscopicidade (1,5340 g.100 g⁻¹).

4.3.3 Cor

Os resultados obtidos para cor nas quatro temperaturas testadas da estufa de circulação forçada estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado dos parâmetros de cor das amostras secas em estufa

TEMPERATURA (°C) / PARÂMETRO	90	110	130	150
L*	33,94	24,51	23,46	20,87
a*	23,72	23,83	11,36	21,48
b*	48,88	35,18	10,95	29,08
C*	54,33	42,49	15,78	36,15
h*	64,11	55,89	43,95	53,55
ΔE	72,06	77,52	76,21	79,74

Fonte: Dados da pesquisa.

O parâmetro L* apresentou redução progressiva com o aumento da temperatura de secagem. A amostra seca a 90°C apresentou maior luminosidade

(33,94), enquanto a menor foi observada a 150°C (20,87). Esse comportamento indica escurecimento do produto em temperaturas mais elevadas, possivelmente associado à intensificação de reações de Maillard, caramelização da lactose e degradação térmica de componentes orgânicos. A diminuição da luminosidade é frequentemente relatada em produtos lácteos submetidos a tratamentos térmicos intensos, refletindo maior desenvolvimento de pigmentos escuros (Gao *et al.*, 2024).

Os valores de a^* permaneceram positivos em todas as condições, indicando predominância de tonalidades avermelhadas. Entretanto, verificou-se comportamento não linear em função da temperatura. As amostras secas a 90°C e 110°C apresentaram valores semelhantes (23,72 e 23,83, respectivamente), enquanto na temperatura de 130°C ocorreu redução acentuada para 11,36, sugerindo menor intensidade de tons avermelhados. Em contrapartida, a amostra submetida a 150°C voltou a apresentar elevação do parâmetro a^* (21,48), possivelmente em decorrência da intensificação das reações de escurecimento não enzimático e formação de compostos pigmentados.

O parâmetro b^* também apresentou valores positivos em todas as amostras, demonstrando predominância de tonalidades amareladas características de produtos lácteos. Observou-se redução expressiva do valor de b^* com o aumento da temperatura até 130°C, passando de 48,88 para 10,95. Contudo, na secagem a 150°C ocorreu novo aumento do parâmetro (29,08).

Nota-se variações dos parâmetros de cor para as diferentes temperaturas de secagem, ao contrário de Muhialdin *et al.* (2026) que ao utilizarem queijo cheddar fresco para produção de petiscos para animais de estimação em diferentes condições de extrusão e secos em estufa a vácuo por 4 h a 72°C, obtiveram resultados com pequenas variações nos parâmetros L^* , a^* , b^* da medição de cor nas diferentes concentrações de queijo. Os autores justificam essa ausência de alterações pela mistura completa de ingredientes devido à alta temperatura, a mistura intensa e o tempo de processamento prolongado. Ou seja, um produto puro poderia ter apresentado resultado semelhante a muçarela seca em estufa de circulação forçada descrito na Tabela 7.

O croma (C^*), que representa a intensidade ou saturação da cor, apresentou valores elevados nas amostras secas a 90°C (2412,97) e 110°C

(1261,46), com redução acentuada nas temperaturas de 130°C (131,26) e 150°C (867,13). Esses resultados indicam que temperaturas intermediárias promoveram perda significativa da vivacidade da cor da muçarela desidratada. A diminuição do croma sugere menor pureza cromática e possível degradação dos componentes responsáveis pela coloração original do produto.

Em relação ao ângulo hue (h°), observou-se redução gradual dos valores com o aumento da temperatura, passando de 64,11° a 90°C para 53,55° a 150°C. Essa diminuição indica mudança da matriz da cor em direção a tonalidades mais escuras e menos amareladas, evidenciando alterações cromáticas decorrentes da intensificação do tratamento térmico. A redução do hue reforça a ocorrência de modificações químicas relacionadas ao escurecimento da matriz láctea durante a secagem.

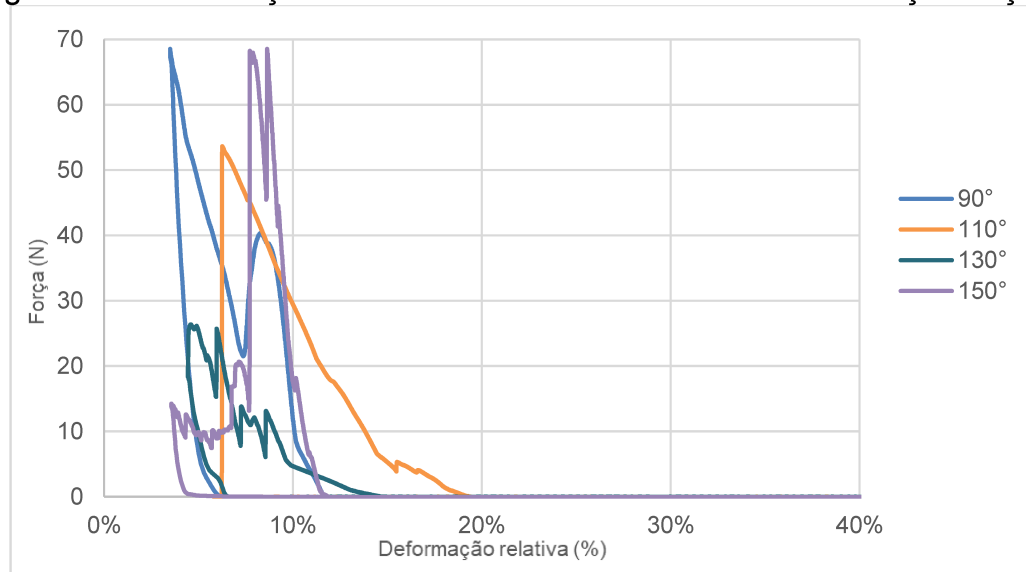
Os elevados valores de ΔE observados em todas as condições (variando entre 72,06 e 79,74) demonstram diferenças perceptíveis de cor entre as amostras e o material de referência. Além disso, o aumento progressivo de ΔE com a elevação da temperatura indica que tratamentos térmicos mais intensos promoveram alterações visuais mais pronunciadas na muçarela desidratada. A maior diferença total de cor foi observada na secagem a 150°C, confirmando que essa condição provocou as alterações cromáticas mais intensas.

De forma geral, os resultados evidenciam que o aumento da temperatura de secagem promoveu alterações significativas na coloração da muçarela desidratada, principalmente pela redução da luminosidade e pelas mudanças nos parâmetros cromáticos associados ao amarelamento e escurecimento do produto. Entre as condições avaliadas, a secagem a 130°C apresentou menor intensidade dos parâmetros a^* e b^* , sugerindo maior perda da coloração característica da muçarela, enquanto a secagem a 150°C promoveu escurecimento mais intenso e maiores diferenças de cor.

4.3.4 Textura - Análise de deformação

A Figura 27 apresenta as curvas de força em função da deformação relativa obtidas por ensaio de perfuração nas amostras de queijo submetidas à secagem em estufa de circulação forçada nas temperaturas de 90, 110, 130 e 150°C.

Figura 27 - Deformação das amostras secas em estufa de circulação forçada



Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que as amostras apresentaram comportamento mecânico característico de materiais desidratados, com aumento inicial da força até a ocorrência da ruptura estrutural, seguido por redução acentuada da resistência devido ao colapso da matriz durante a penetração da sonda. Além disso, os resultados demonstram que a temperatura de secagem exerceu influência significativa sobre a resistência mecânica das amostras.

As amostras secas a 90°C e 150°C apresentaram os maiores valores de força máxima, atingindo aproximadamente 68 N, indicando maior resistência à perfuração. Esse comportamento sugere que essas condições de processamento favoreceram a formação de estruturas mais rígidas e compactas, capazes de suportar maiores tensões antes da ruptura. No caso da secagem a 90°C, a remoção mais gradual da umidade pode ter contribuído para uma reorganização mais uniforme da matriz proteica, resultando em maior integridade estrutural ao longo do elevado tempo de secagem. Já para 150°C, a elevada temperatura pode ter promovido um

endurecimento superficial mais intenso, associado à formação de uma camada externa mais rígida devido à rápida perda de água na superfície do produto.

Em contrapartida, a amostra seca a 130°C apresentou os menores valores de força máxima, não ultrapassando aproximadamente 25 N. Esse resultado indica uma estrutura significativamente menos resistente à perfuração, possivelmente em decorrência de alterações microestruturais provocadas pela taxa intermediária de secagem. As oscilações observadas em algumas curvas, principalmente nas amostras secas a 130°C e 150°C, evidenciam a ocorrência de fraturas sucessivas durante o avanço da sonda.

A amostra processada a 110°C apresentou comportamento intermediário, com força máxima próxima de 50 N. Entretanto, diferentemente das demais condições, sua curva apresentou uma região mais extensa de resistência após o pico inicial, estendendo-se até aproximadamente 18% de deformação relativa. Esse comportamento sugere que a estrutura apresentou maior capacidade de deformação antes da ruptura completa, absorvendo energia por um período mais prolongado durante a perfuração. Tal característica pode estar associada a uma distribuição mais homogênea da umidade residual e a uma matriz estrutural menos frágil em comparação às demais temperaturas avaliadas (Atik e Huppertz, 2023; Siddiqui *et al.*, 2023). Esses achados evidenciam que a seleção adequada da temperatura de secagem é fundamental para controlar as propriedades texturais do queijo desidratado por estufa de circulação forçada

Outro aspecto importante refere-se à deformação correspondente à ruptura. Observa-se que os picos de força ocorreram em baixos níveis de deformação relativa, predominantemente entre 3% e 10%, indicando que as amostras apresentaram comportamento predominantemente frágil. Esse resultado é compatível com produtos submetidos à secagem intensa, nos quais a redução do teor de água diminui a capacidade de deformação plástica da matriz alimentar. Siddiqui *et al.* (2023) destacam que alimentos submetidos à secagem convectiva geralmente apresentam aumento da firmeza, da resistência mecânica e da fragilidade. A água atua como agente plastificante, aumentando a mobilidade molecular e a flexibilidade estrutural; portanto, sua remoção favorece o aumento da rigidez e a ocorrência de ruptura sob menores níveis de deformação.

Comparando-se os resultados obtidos na estufa de circulação forçada com aqueles observados para a secagem por micro-ondas, verifica-se que as forças máximas registradas na estufa foram consideravelmente menores. Enquanto as amostras secas por micro-ondas apresentaram valores superiores a 130 N em determinadas condições, as amostras secas em estufa atingiram valores máximos próximos de 70 N. Esse comportamento sugere que o mecanismo de transferência de calor influencia diretamente a formação da microestrutura do produto. A secagem por micro-ondas promove aquecimento volumétrico e pode resultar em estruturas mais densas e resistentes em determinadas condições operacionais, ao passo que a secagem convectiva em estufa tende a favorecer gradientes de umidade mais pronunciados e alterações estruturais distintas.

Além disso, a menor faixa de deformação observada para as amostras secas em estufa indica que essas estruturas apresentaram ruptura mais precoce quando comparadas às amostras processadas por micro-ondas. Isso sugere uma menor capacidade de absorção de energia antes da falha estrutural, refletindo um comportamento mecânico mais frágil. Sob a perspectiva tecnológica, esses resultados demonstram que a temperatura de secagem em estufa afeta significativamente a textura final do produto, influenciando atributos como dureza, resistência à perfuração, crocância e fragilidade (Ayranci *et al.* 2026; Chudy *et al.*, 2019; Simão *et al.*, 2025).

4.3.5 Cinética de secagem

Os parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002), estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais para as diferentes temperaturas de secagem em estufa de circulação forçada, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli *et al.* (2002) na secagem por estufa de circulação forçada

EXPERIMENTOS	k	n	A	B	R ²
90°C	-0,002806	0,979488	1,001112	-0,006989	0,9985
110°C	0,001392	1,418139	1,008168	-0,000558	0,9995
130°C	0,002123	1,624877	1,004418	-0,000732	0,9996
150°C	-0,188016	0,557697	1,000000	-0,107516	0,9999

Fonte: Dados da pesquisa.

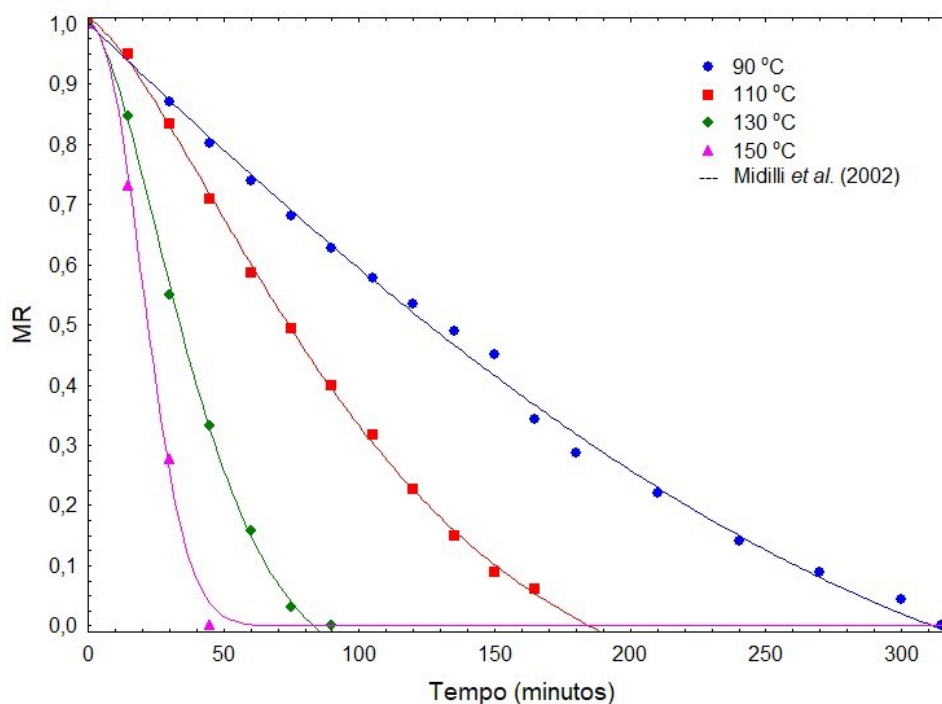
Observou-se que o aumento da temperatura promoveu redução significativa do tempo necessário para atingir baixos valores de MR, consequência do aumento da taxa de transferência de calor e da difusividade efetiva da água no interior da amostra. Esse comportamento é amplamente descrito para secagem convectiva de alimentos e explica a redução do tempo de secagem observada experimentalmente entre 90 e 150°C.

Além disso, verifica-se que o modelo de Midilli *et al.* (2002) apresentou excelente desempenho estatístico em todas as temperaturas, sendo capaz de representar adequadamente a cinética global do processo. Entretanto, os valores negativos de k observados em 90 e 150°C indicam que a interpretação dos parâmetros deve ser realizada conjuntamente com os indicadores estatísticos e com a coerência física do modelo, e não apenas pelos valores numéricos obtidos.

É importante destacar um aspecto referente aos resultados obtidos a 150°C. Os parâmetros estimados para essa temperatura ($k = -0,1880$, $n = 0,5577$ e $B = -0,1075$) diferem do comportamento esperado para o modelo de Midilli. Embora o ajuste tenha apresentado $R^2 = 0,9999$, o valor negativo de k não possui interpretação física para um processo de secagem nessas condições, pois implicaria aumento da razão de umidade com o tempo caso fosse analisado isoladamente. Isso sugere que o algoritmo de regressão encontrou uma solução matemática que minimizou o erro experimental, mas sem preservar o significado físico dos parâmetros.

A Figura 28 apresenta as curvas de cinética de secagem da muçarela em estufa de circulação forçada de ar nas temperaturas de 90, 110, 130 e 150°C, expressas pela razão de umidade (MR) em função do tempo e seus ajustes ao modelo de Midilli *et al.* (2002). Em todas as condições experimentais observa-se a redução contínua da MR ao longo do processo, sendo evidente a influência da temperatura sobre a velocidade de remoção da água.

Figura 28 - Cinética de secagem das amostras secas por estufa de circulação forçada



Fonte: Dados da pesquisa.

O aumento da temperatura resultou em maior velocidade de remoção de água e consequente redução do tempo de secagem. Enquanto a secagem a 90°C demandou aproximadamente 320 min para atingir a umidade de equilíbrio, o tempo foi reduzido para cerca de 190, 90 e 50 minutos nas temperaturas de 110, 130 e 150°C, respectivamente, como já comentado. Esse comportamento demonstra que a temperatura é a variável operacional que mais influencia a taxa de remoção de água em secagem convectiva, uma vez que aumenta simultaneamente a transferência de calor para o alimento e a difusividade efetiva da umidade em seu interior.

Além da redução do tempo total de secagem, observa-se que as maiores temperaturas resultaram em curvas com declínio mais acentuado da razão de umidade nos estágios iniciais do processo. Isso ocorre porque temperaturas elevadas aumentam o gradiente de pressão de vapor entre o interior da amostra e o ar de secagem, favorecendo a evaporação da água superficial e intensificando a migração da umidade interna. De forma semelhante, Bhattacharjee *et al.* (2024) ressaltam que a elevação da temperatura é responsável pelo aumento da taxa de transferência de calor e massa, reduzindo o tempo de processamento. Os autores também discutem

que temperaturas excessivamente elevadas podem provocar alterações estruturais, endurecimento superficial, escurecimento e perdas de qualidade, tornando necessária a otimização das condições operacionais.

À medida que a secagem avança, entretanto, a velocidade de remoção de água diminui devido à redução da água livre disponível e ao aumento da resistência interna ao transporte de massa, caracterizando o período de taxa decrescente, predominante na secagem de alimentos ricos em proteínas, como os derivados lácteos.

Arpaci *et al.* (2024) realizaram uma ampla revisão sobre modelagem matemática da secagem convectiva e destacaram o modelo de Midilli como sendo um dos mais empregados em ensaios de secagem devido à sua elevada precisão em diferentes produtos agrícolas e alimentícios. Aranha *et al.* (2023) destacam a difusão efetiva da umidade como sendo o principal mecanismo controlador da secagem convectiva na maior parte dos alimentos e confirma que os modelos de camada fina, especialmente o de Midilli, apresentam excelente desempenho na descrição da cinética de secagem em diferentes materiais biológicos.

4.4 Secagem em liofilizador

4.4.1 Considerações gerais, umidade, atividade de água e higroscopicidade

Na Figura 29 é possível observar as amostras obtidas após exposição no liofilizador por 48 h.

Figura 29 - Aspecto das amostras de muçarela após secagem em liofilizador por 48 h.



Fonte: A autora, 2024.

Nota-se que visualmente não houve alteração na coloração das amostras, nem no seu formato original, características comuns do processo de secagem por liofilização e bem diversa dos outros métodos avaliados. Os resultados de teor de umidade e atividade de água obtidas na secagem por liofilização em 2, 4, 6, 12, 24, 48 e 72 h são apresentados na Tabela 9. Diferentemente dos outros secadores, foram se avaliando as amostras ao longo de diferentes tempos a fim de verificar o comportamento e tempo necessários das amostras para se atingir o valor de atividade de água adequado (entre 0,300 e 0,500).

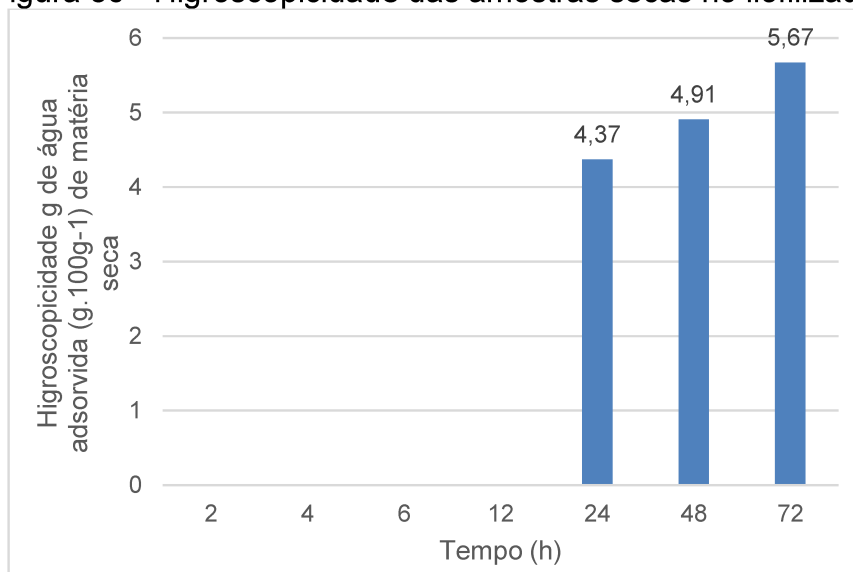
Tabela 9 - Resultados da secagem em liofilizador

TEMPO (h)	UMIDADE (%)	ATIVIDADE DE ÁGUA
2	34,08 ±0,91	0,974
4	33,09 ±3,84	0,954
6	10,02 ±0,56	0,916
12	7,22 ±0,34	0,763
24	4,39 ±0,09	0,383
48	3,24 ±0,22	0,249
72	1,22 ±0,10	0,208

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados de higroscopicidade das amostras secas por 24, 48 e 72 h são apresentados na Figura 30. Essas condições apresentaram umidade inferior a 5%; quanto à atividade de água, a amostra de 24 h apresentou valor dentro da faixa de 0,300–0,500 estabelecida como critério para o processo (resultados adequados), enquanto as amostras de 48 e 72 h apresentaram valores inferiores ao limite estabelecido.

Figura 30 - Higroscopicidade das amostras secas no liofilizador



Fonte: Dados da pesquisa.

Nota: Os campos sem presença de valores são aqueles que não foram analisados.

Nos tempos iniciais de liofilização (2 e 4 h), as amostras apresentaram elevados teores de umidade, de 34,08% e 33,09%, respectivamente, além de atividade de água acima de 0,900. Esses valores indicam que o processo de remoção de água ainda se encontrava em estágio inicial, impossibilitando a obtenção de um produto com características adequadas de estabilidade microbiológica. Além disso, as amostras não apresentaram aspecto visual de material seco, razão pela qual não foi determinada a higroscopicidade nessas condições.

Após 6 h de liofilização, verificou-se redução expressiva da umidade para 10,02%, embora a atividade de água ainda tenha permanecido elevada (0,916). Na condição de 12 h de liofilização, a amostra apresentou teor de umidade de 7,22% e atividade de água de 0,763, indicando continuidade da remoção de água e aumento gradual da estabilidade do produto, apesar de um valor ainda maior do desejado, optando-se por esse motivo a não submeter essa amostra à análise de higroscopicidade. Esse comportamento demonstra que a redução da umidade nem sempre ocorre de forma proporcional à diminuição da água livre disponível no alimento, especialmente em sistemas lácteos complexos, nos quais parte da água permanece ligada à matriz proteica (Matos *et al.*, 2020).

Manzoor *et al.* (2025) avaliando o efeito do tempo de liofilização no teor de umidade de queijo tipo muçarela, cheddar e queijo modificado por enzimas em

diferentes formatos também observaram que à medida que o tempo de liofilização aumentava, o teor de umidade diminuía substancialmente em todos os formatos de queijo. Para as amostras de muçarelas em formato de cubos os autores relataram que a umidade diminuiu de 18,62% em 5 h de secagem para 2,32% em 20 h. Somente a partir de 24 h de liofilização as amostras, conforme mostra a Tabela 9, atingiram parâmetros compatíveis com produtos secos, apresentando atividade de água dentro da faixa considerada adequada (0,383) e umidade residual para 4,39%. Nessa condição, foi possível determinar higroscopicidade ($4,3684 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$).

Koprualan *et al.* (2020) estudaram experimentalmente queijo branco com baixo teor de gordura, seco utilizando três métodos diferentes: secagem com ar quente (50, 60 e 70°C com fluxo de ar de 1,8 m/s), secagem por micro-ondas (180, 360 e 540 W) e liofilização (0,2, 0,15 e 0,1 mbar). Medições de parâmetros como temperatura, pressão, tempo, peso e potência foram registradas para todos os três métodos. Os autores, assim como Manzoor *et al.* (2025), descreveram que a liofilização exigiu um tempo ligeiramente menor em comparação com a secagem com ar quente, por exemplo.

Retornando aos experimentos realizados no presente estudo, tem-se que, com o aumento do tempo de liofilização para 48 h, ocorreu nova redução da umidade (3,24%) e da atividade de água (0,249), acompanhada de aumento da higroscopicidade para $4,9056 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$. Esse comportamento indica que a remoção mais intensa de água promoveu aumento do gradiente de adsorção de umidade em relação ao ambiente (Matos *et al.*, 2020; Pedro, 2009).

Na maior duração de secagem avaliada, correspondente a 72 h de liofilização, foram observados os menores valores de umidade (1,22%) e atividade de água (0,208), além da maior higroscopicidade ($5,6704 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Esse resultado demonstra que a intensificação da secagem promove aumento progressivo da capacidade de adsorção de umidade do produto. A remoção quase completa da água estrutural aumenta significativamente a afinidade do material pela umidade do ambiente. Além disso, uma característica marcante de produtos liofilizados é sua boa capacidade de reidratação (Karagul *et al.* 2018; Evangelista, 2005).

4.4.2 Cor

Os resultados obtidos para cor obtidas na secagem por liofilização em 2, 4, 6, 12, 24, 48 e 72 h estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas em liofilizador

TEMPO (h)/ PARÂMETRO	2	4	6	12	24	48	72
L*	95,64	90,52	63,38	87,82	67,48	89,29	92,78
a*	0,35	0,55	1,24	0,54	0,27	0,43	0,46
b*	14,57	17,82	21,42	16,39	18,41	22,42	25,12
C*	14,57	17,83	21,46	16,40	18,41	22,42	25,12
h°	88,62	88,23	86,69	88,11	89,16	88,90	88,95
ΔE	10,20	9,81	34,42	12,78	30,78	8,62	4,89

Fonte: Dados da pesquisa.

O parâmetro L*, que representa a luminosidade da amostra, apresentou valores entre 63,38 e 95,64 nas diferentes condições de tempo de liofilização. O maior valor foi observado após 2 h de processo (95,64), enquanto os menores valores ocorreram em 6 e 24 h, com 63,38 e 67,48, respectivamente. Apesar dessas reduções pontuais desses dois tempos intermediários, a maior parte das condições apresentou valores elevados de L*, próximos de 90, indicando a manutenção de elevada luminosidade das amostras ao longo da maior parte do processo. Em comparação com a amostra in natura (L*=97,64), todas as amostras liofilizadas apresentaram tendência redução da luminosidade, embora essa redução tenha sido mais pronunciada nas condições de 6 e 24 h. De modo geral, portanto, os resultados indicam que a liofilização promoveu redução da luminosidade em relação ao produto in natura, porém, na maior parte das condições, os valores de L* permaneceram próximos de 90. Destaca-se ainda que a redução da luminosidade observada após a liofilização foi consideravelmente menor do que aquela verificada nas amostras submetidas aos demais métodos de secagem avaliados, indicando maior preservação da luminosidade original do queijo pela liofilização.

Os valores do parâmetro a* permaneceram positivos em todos os tempos avaliados, indicando leve tendência à coloração avermelhada, porém com valores baixíssimos quando comparado aos demais secadores utilizados. Já os valores de b* foram positivos e aumentaram progressivamente ao longo da liofilização, indicando predominância e intensificação da coloração amarela das amostras, assim como

relatado por Takma *et al.* (2024), que obtiveram após o processo de liofilização, para as amostras em pó de queijo branco, um aumento nos valores de L^* , a^* e b^* , resultando em uma cor mais branca. Esse fenômeno pode ser explicado pela remoção de água da estrutura durante a liofilização, levando a um aumento na intensidade da cor derivada do queijo.

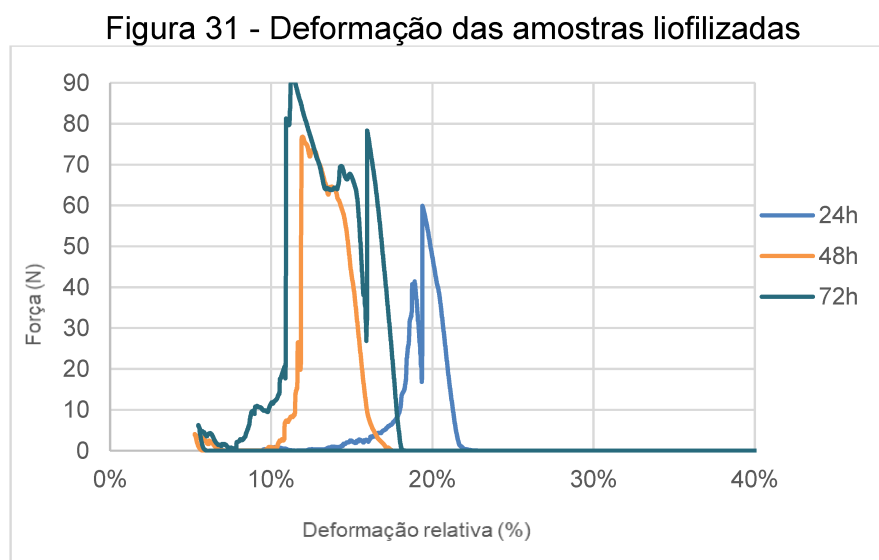
O aumento dos valores de cromaticidade (C^*) confirma que a cor das amostras se tornou mais intensa ao longo da liofilização, principalmente nos tempos mais prolongados. Em contrapartida, os valores de ângulo Hue (h°) permaneceram relativamente constantes, entre 86° e 89° , demonstrando que a tonalidade predominante continuou situada na faixa amarela característica da muçarela.

Em relação à diferença total de cor (ΔE), os valores obtidos variaram de 4,89 a 34,42 entre os diferentes tempos de liofilização. Na maior parte das condições, os valores de ΔE permaneceram relativamente baixos, variando entre 4,89 e 12,78, enquanto as condições de 6 e 24 h apresentaram valores mais elevados, de 34,42 e 30,78, respectivamente. Esses resultados indicam que, nessas duas condições, as diferenças globais de cor em relação à amostra de referência foram mais pronunciadas. Essas diferenças observadas em 6 e 24 h devem, entretanto, ser interpretadas com cautela, uma vez que o cálculo de ΔE considera conjuntamente as variações dos parâmetros L^* , a^* e b^* . Nessas condições, destacam-se particularmente os menores valores de L^* observados em relação às demais amostras, o que contribui para o aumento da diferença total de cor em relação à amostra in natura. Assim, não se deve associar o maior ΔE exclusivamente a alterações na tonalidade ou em um único parâmetro de cor.

De modo geral, os valores de ΔE obtidos na liofilização foram inferiores aos observados nos demais métodos de secagem avaliados, indicando menor alteração global da cor em relação à amostra in natura. Esse comportamento sugere maior preservação das características de cor do queijo nas condições de liofilização estudadas, embora tenham sido observadas variações pontuais nos tempos de 6 e 24 h. Embora tenham sido observadas diferenças pontuais, especialmente nos tempos de 6 e 24 h, os resultados de ΔE sugerem que a liofilização apresentou maior capacidade de preservação da cor original da muçarela nas condições experimentais avaliadas.

4.4.3 Textura - Análise de deformação

A Figura 31 apresenta aos resultados força em função da deformação das amostras secas no liofilizador. Nesse caso, os ensaios de perfuração em texturômetro foram realizados apenas nas amostras que apresentaram características compatíveis com produtos secos, conforme verificado nas análises de caracterização previamente conduzidas. Assim, somente as amostras liofilizadas por 24, 48 e 72 h, cujos valores de teor de umidade e atividade de água se enquadraram nos parâmetros estabelecidos para produtos secos, ou seja, umidade residual inferior de 5% e atividade de água menor que 0,500, além do aspecto quebradiço observado durante as análises, foram selecionadas para a avaliação das propriedades mecânicas por meio do teste de perfuração.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que os maiores valores de força foram atingidos em baixas a moderadas deformações, concentrando-se principalmente entre 10% e 20%, indicando que a estrutura seca apresenta limitada capacidade de deformação antes da ocorrência da falha.

As amostras liofilizadas por 72 h atingiram elevados níveis de força em deformações relativamente baixas, sugerindo uma estrutura mais rígida e menos deformável. Esse comportamento é característico de materiais com maior resistência mecânica, nos quais pequenas deformações são suficientes para gerar elevadas tensões internas, culminando em rupturas localizadas. A ocorrência de múltiplos picos

após a primeira fratura indica que a estrutura não colapsa completamente após a ruptura inicial, mas sofre falhas sucessivas de diferentes regiões internas durante o avanço da sonda (Siddiqui *et al.*, 2023).

As amostras de 48 h apresentaram comportamento intermediário, alcançando o pico de força em uma faixa semelhante de deformação, porém com menor resistência máxima. A redução abrupta da força após o pico sugere uma ruptura estrutural rápida, indicando menor capacidade de redistribuição das tensões após o início da falha. Já as amostras de 24 h apresentaram os eventos de ruptura em níveis de deformação mais elevados, próximos de 20%, demonstrando maior capacidade de acomodação da deformação antes da falha completa.

Os resultados sugerem que o aumento do tempo de liofilização promove uma redução da deformabilidade do material, tornando-o mais rígido e resistente à perfuração. Assim, verifica-se uma tendência de comportamento inverso entre resistência e deformação: amostras mais resistentes atingem maiores forças máximas, porém suportam menores deformações antes da ocorrência das rupturas estruturais. Tal pensamento condiz com o descrito por Simão *et al.* (2025), embora o método de secagem seja micro-ondas a vácuo e não liofilização, os autores mostram que a redução da umidade e a reorganização da matriz proteica alteram significativamente a resistência mecânica e a resposta em ensaios de perfuração, reforçando a interpretação de que mudanças na microestrutura decorrentes da secagem influenciam simultaneamente a força máxima e a deformabilidade do produto.

4.4.4 Cinética de secagem

Os parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002), estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais nos experimentos do liofilizador são apresentados na Tabela 11. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9662$) demonstra que aproximadamente 96,6% da variabilidade experimental foi explicada pelo modelo de Midilli, indicando um ajuste considerado satisfatório, mesmo que menor em relação aos outros secadores estudados.

Entretanto, observa-se que esse valor é ainda inferior aos normalmente reportados para secagem convectiva e por micro-ondas, nos quais frequentemente são obtidos R^2 superiores a 0,99. Essa diferença pode ser atribuída às particularidades da liofilização, cuja cinética apresenta duas etapas distintas (secagem primária e secundária), além do número relativamente reduzido de pontos experimentais utilizados no ajuste.

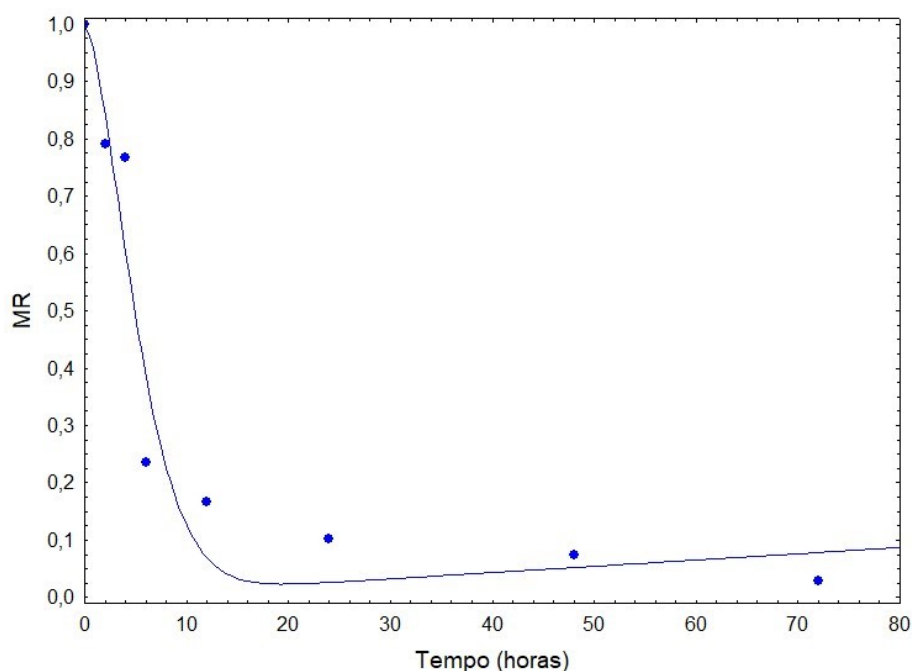
Tabela 11 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Midilli *et al.* (2002) para as amostras liofilizadas

EXPERIMENTOS	K	n	A	B	R^2
LIOFILIZADOR	0,057091	1,570177	0,996910	0,001093	0,9662

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 32 apresenta a evolução da razão de umidade (MR) das amostras de muçarela submetidas à liofilização em diferentes tempos de processamento. Cada ponto experimental corresponde a uma amostra independente retirada ao final do período de secagem indicado, permitindo acompanhar a evolução da remoção de água ao longo do processo.

Figura 32 - Cinética de secagem das amostras liofilizadas



Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se uma redução acentuada da razão de umidade nas primeiras horas de liofilização. A MR diminui de aproximadamente 1,0 para valores inferiores a 0,20 em cerca de 8 a 12 h, indicando que a maior parte da água presente no produto foi removida durante a fase inicial do processo. Após a redução inicial mais acentuada da MR, observa-se uma diminuição da taxa de remoção de água, com a umidade tendendo gradualmente à condição de equilíbrio. comportamento característico da liofilização de alimentos.

A rápida redução inicial da umidade está associada à secagem primária, etapa em que ocorre a sublimação do gelo formado durante o congelamento da amostra. Nessa fase, a transferência de calor fornece a energia necessária para que o gelo passe diretamente do estado sólido para o vapor, mantendo baixas temperaturas no produto e preservando sua estrutura física. Como a maior parte da água encontra-se congelada, a remoção de umidade ocorre de maneira relativamente rápida enquanto existe gelo disponível para sublimar (Nowak; Jakubczyk, 2020).

Após aproximadamente 12 h, verificou-se uma redução expressiva da velocidade de secagem. Esse comportamento corresponde ao início da secagem secundária, etapa em que a água remanescente se encontra adsorvida à matriz proteica da muçarela e sua remoção passa a depender da difusão molecular e da dessorção das moléculas de água ligadas aos constituintes do alimento. Consequentemente, pequenas reduções adicionais na umidade exigem tempos significativamente maiores de processamento.

Embora o ajuste matemático indique uma discreta elevação da MR após aproximadamente 20 h, esse comportamento não possui significado físico, uma vez que a razão de umidade não aumenta durante a secagem. Essa tendência decorre da limitação do modelo empregado e da pequena quantidade de pontos experimentais na região final da curva. Esse resultado sugere que tempos superiores a aproximadamente 24 h promovem apenas reduções marginais na umidade, podendo representar aumento do consumo energético sem ganhos proporcionais na eficiência do processo. Os resultados evidenciam que a maior eficiência da liofilização ocorre durante as primeiras horas de processamento, enquanto a etapa final é controlada pela remoção da água fortemente ligada à estrutura da matriz alimentar.

4.5 Secagem em *air fryer*

Na Figura 33 é possível observar o comportamento da amostra durante o processo de secagem em *air fryer*. O queijo se comportou de maneira semelhante ao observado nos outros secadores de aquecimento. Em um primeiro momento, ocorreu o amolecimento térmico da amostra, seguido da secagem propriamente dita, durante a qual se observou maior escurecimento nas bordas da amostra em comparação à região central.

Figura 33 - Muçarela em processo de derretimento na *air fryer*



Fonte: A autora, 2024.

Os resultados obtidos para a secagem de muçarela nos dois modos operacionais distintos da *air fryer* (“assar” e “fritar sem óleo”) são descritos a seguir.

4.5.1 Modo “assar”

4.5.1.1 Umidade e atividade de água

Os resultados de tempo de secagem, teor de umidade e atividade de água do queijo muçarela secos na *air fryer* no modo “assar”, nas temperaturas de 90, 120, 130, 150, 180 e 210°C e são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das amostras secas na *air fryer* modo assar

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)	UMIDADE (%)	ATIVIDADE DE ÁGUA
90	156	3,61 ±3,44	0,465
120	68	2,29 ±0,72	0,327
150	37	1,55 ±0,26	0,398
180	25	2,10 ±0,47	0,424
210	20	1,05 ±0,21	0,360

Fonte: Dados da pesquisa.

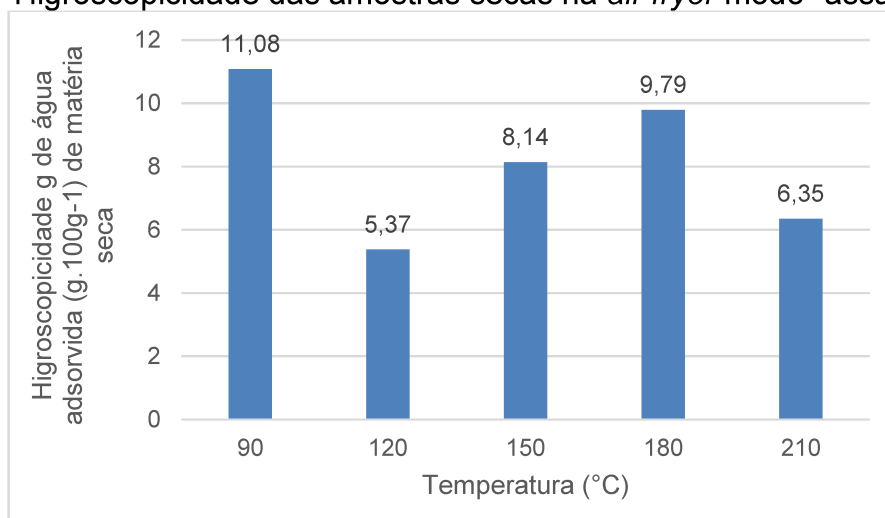
Observou-se, de forma bastante evidente, a redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura. Enquanto a secagem a 90°C demandou 156 min, a 210°C o processo ocorreu em apenas 20 min (9,52%). Esse resultado confirma a maior eficiência das temperaturas elevadas na remoção de água do produto. O teor de umidade é reduzido proporcionalmente à temperatura, porque o alimento é aquecido em um sistema fechado na *air fryer* onde a transferência de calor ocorre por convecção forçada, aumentando sua intensidade conforme a temperatura empregada (Fikry *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2016).

A atividade de água apresentou valores relativamente baixos em todas as temperaturas, variando entre 0,327 e 0,465, dentro da faixa desejada. Apesar da redução geral da umidade residual, a atividade de água não apresentou comportamento totalmente linear, possivelmente devido às alterações estruturais e à redistribuição da água ligada durante o aquecimento.

4.5.1.2 Higroscopicidade

Na Figura 34, são apresentados os resultados obtidos para higroscopicidade do queijo desidratado na *air fryer* no modo “assar”.

Figura 34 - Higroscopicidade das amostras secas na *air fryer* modo "assar"



Fonte: Dados da pesquisa.

O maior valor de higroscopicidade foi observado a 90°C (11,08 g.100g⁻¹), enquanto o menor ocorreu a 120°C (5,37 g.100g⁻¹). Segundo a classificação descrita por Gea (2003), a amostra seca a 90°C pode ser considerada ligeiramente higroscópica, já que apresentou resultado acima de 11% e menor que 15%. De modo geral, os resultados não apresentam uma tendência definida com o aumento da temperatura. Numericamente, observa-se redução da higroscopicidade de 90 para 120 °C, seguida de aumento até 180 °C e nova redução em 210 °C.

4.5.1.3 Cor

Os resultados obtidos para cor no modo “assar” na *air fryer* estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas no modo assar da *air fryer*

TEMPERATURA (°C) / PARÂMETRO	90	120	150	180	210
L*	23,99	22,97	23,34	25,50	22,39
a*	26,97	26,12	26,13	28,71	26,25
b*	39,48	37,10	37,78	42,72	37,08
C*	47,81	45,37	45,94	51,47	45,43
h°	55,66	54,85	55,33	56,10	54,70
ΔE	79,71	79,97	79,73	79,60	80,55

Fonte: Dados da pesquisa.

Quanto aos parâmetros de cor, observou-se que os valores de luminosidade (L^*) permaneceram relativamente próximos entre os tratamentos, variando de 22,39 a 25,50, indicando que o produto manteve aspecto escuro em todas as condições avaliadas. O maior valor de L^* foi obtido em 180°C, o que sugere uma amostra ligeiramente mais clara nessa condição. Heredia *et al.* (2014) também não detectaram variação em L^* durante a fritura com ar quente em batatas sem pré-tratamento e congeladas.

Em contrapartida, Teruel *et al.* (2015) afirmaram que L^* diminui com o tempo nos processos de fritura tradicional e em *air fryer*, enquanto a^* e b^* aumentam; essa tendência foi relevante no estudo com batatas que ficaram vermelho-escuras e amareladas. Para os autores a fritura em *air fryer* pode atingir a cor característica das batatas fritas tradicionais, embora exija um tempo de processamento mais longo.

O parâmetro a^* apresentou valores positivos em todas as temperaturas, indicando tendência à coloração avermelhada. Houve aumento em 180°C (28,71), sugerindo intensificação dessa tonalidade. Os valores de b^* também foram positivos, indicando predominância da coloração amarela. Entretanto, observou-se leve redução em temperaturas mais elevadas, especialmente em 210°C, o que pode indicar escurecimento térmico mais intenso e degradação de pigmentos.

O parâmetro C^* (cromaticidade) variou entre 45,37 e 51,47. O maior valor obtido em 180°C demonstra cor mais intensa e saturada nessa condição, sugerindo maior vivacidade visual do produto. Em temperaturas mais altas, como 210°C, houve redução da cromaticidade, possivelmente devido ao escurecimento excessivo causado pelo tratamento térmico.

O parâmetro h° (ângulo de tonalidade) apresentou valores relativamente próximos entre as diferentes temperaturas de secagem, variando de 51,47° a 55,66°. A amostra submetida a 90°C apresentou o maior valor de H (55,66°), enquanto a menor tonalidade foi observada a 180°C (51,47°). Entretanto, como os valores retornaram para 54,70° a 210°C, não foi observada uma tendência linear com a temperatura, sugerindo que a alteração da tonalidade resulta da interação entre temperatura, tempo de exposição e transformações físico-químicas ocorridas durante a secagem.

Em relação ao ΔE , os valores permaneceram elevados e relativamente próximos entre as condições avaliadas, variando de 79,60 a 80,55. O menor valor foi observado a 180 °C (79,60), enquanto o maior ocorreu a 210 °C (80,55). Esses resultados indicam uma alteração de cor muito expressiva das amostras após a secagem, caso a referência seja a muçarela in natura ou a amostra controle.

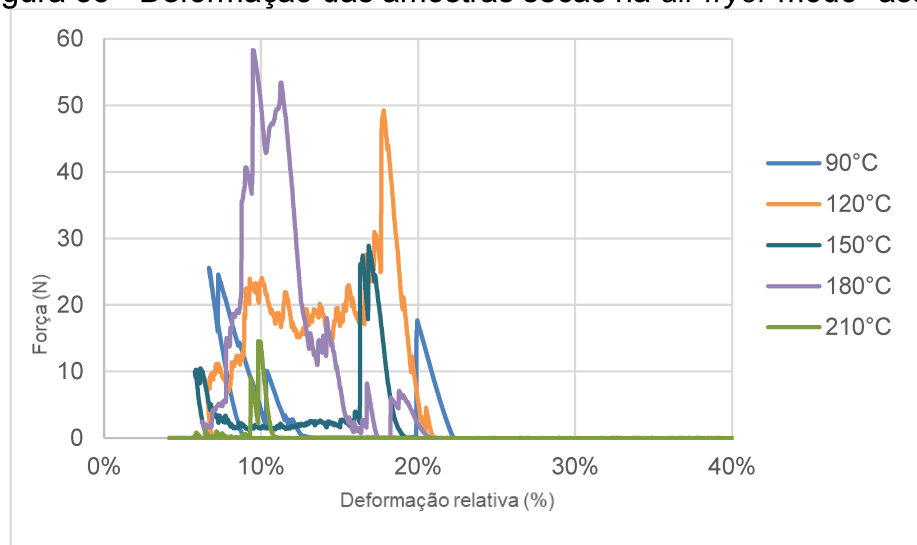
Pode-se notar que o comportamento do queijo na *air fryer* foi semelhante ao observado na estufa de circulação forçada, isso porque o fluxo de ar dentro da fritadeira de ar quente é forçado sobre o alimento, de forma semelhante a um forno de convecção. Vale mencionar que diversas reações que ocorrem durante o processo de fritura, como gelatinização do amido, reações de Maillard, desnaturação de proteínas e douramento da massa, afetam o desenvolvimento da crosta e a cor do alimento frito (Ghaitaranpour *et al.*, 2018).

De forma geral, os resultados indicam que o aumento da temperatura na secagem em *air fryer* promoveu maior eficiência na remoção de água e redução do tempo de processamento. Contudo, temperaturas muito elevadas podem causar alterações mais intensas na cor do produto. A condição de 180 °C apresentou equilíbrio interessante entre menor tempo de secagem, baixa umidade, atividade de água adequada e melhor intensidade de cor, podendo representar uma condição promissora para obtenção de queijo muçarela seco com características tecnológicas e visuais satisfatórias.

4.5.1.4 Textura – Análise de Deformação

A Figura 35 apresenta as curvas de força em função da deformação relativa obtidas por ensaio de perfuração em amostras de queijo submetidas à secagem na *air fryer* no modo “assar” nas temperaturas de 90, 120, 150, 180 e 210°C.

Figura 35 - Deformação das amostras secas na *air fryer* modo "assar"



Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, os picos de força foram registrados entre aproximadamente 8% e 20% de deformação relativa, indicando que as amostras apresentam baixa capacidade de deformação antes da falha mecânica.

Entre os tratamentos avaliados, as amostras secas a 180°C apresentaram os maiores valores de força máxima, atingindo aproximadamente 55–60 N. Além da elevada resistência à perfuração, essas amostras romperam em níveis relativamente baixos de deformação, sugerindo a formação de uma estrutura rígida e pouco deformável. Esse comportamento pode estar relacionado à intensificação das modificações estruturais promovidas pela alta temperatura, como endurecimento da superfície e maior compactação da matriz do produto.

As amostras processadas a 120°C também apresentaram elevada resistência mecânica, com picos próximos de 50 N e ruptura concentrada entre 15% e 20% de deformação. Esse resultado sugere um equilíbrio entre resistência estrutural e capacidade de deformação, possivelmente devido a uma secagem suficientemente intensa para promover rigidez, mas sem provocar o endurecimento excessivo observado em temperaturas mais elevadas, conforme descrito por Kumar e Karim, (2019).

Nas amostras secas a 90 e 150°C, os valores máximos de força foram inferiores, variando aproximadamente entre 25 e 30 N. Embora as deformações de ruptura permaneçam na mesma faixa observada para os demais tratamentos, a menor

força necessária para a perfuração indica estruturas menos resistentes, provavelmente associadas a diferenças na taxa de remoção de água e no grau de colapso estrutural durante o processo de secagem (Siddiqui *et al.*, 2023; Simão *et al.*, 2025).

As amostras submetidas a 210°C apresentaram comportamento bastante distinto, com valores de força próximos de zero durante praticamente todo o ensaio, sugerindo uma perda significativa da integridade estrutural do material, possivelmente decorrente de degradação térmica excessiva, carbonização localizada ou formação de uma estrutura extremamente frágil, incapaz de oferecer resistência significativa à penetração da sonda (Kumar & Karim, 2019; Ayranci *et al.*, 2026).

De forma geral, os resultados indicam que a temperatura de secagem influencia significativamente a textura do material. Temperaturas intermediárias a elevadas (120–180°C) favoreceram o desenvolvimento de estruturas mais resistentes à perfuração, enquanto temperaturas muito elevadas (210°C) promoveram deterioração estrutural. A combinação entre altos valores de força e baixas deformações observadas principalmente a 180°C sugere a obtenção de um produto com maior rigidez e crocância, características frequentemente associadas à qualidade textural de alimentos desidratados.

4.5.1.5 Cinética de Secagem

Os parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002), estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais de secagem das amostras submetidas à air fryer no modo ‘assar’, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002) estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais para as amostras secas na *air fryer* modo "assar"

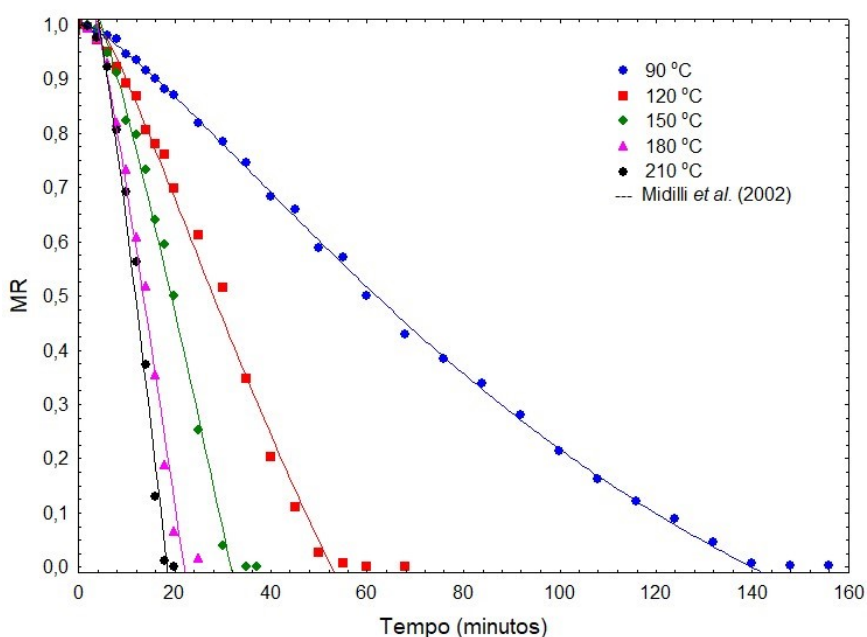
PARÂMETROS	k	N	A	B	R ²
90°C	0,002043	1,350600	1,006951	0,001431	0,9997
120°C	0,100684	0,606835	0,973215	0,056451	0,9973
150°C	0,134925	0,480093	0,973702	0,062413	0,9963
180°C	0,174006	0,474978	0,981058	0,095160	0,9956
210°C	0,240151	0,426262	0,969817	0,1207239	0,9915

Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que em todas as temperaturas avaliadas (90, 120, 150, 180 e 210°C), o modelo apresentou excelente desempenho estatístico, com coeficientes de determinação variando entre 0,9915 e 0,9997, indicando elevada concordância entre os valores experimentais e aqueles estimados pelo modelo. A secagem em *air fryer* é reconhecida por promover redução expressiva do tempo de processamento quando comparada à secagem convectiva convencional, em razão da elevada velocidade de circulação do ar quente. Resultados semelhantes foram apresentados por Zeng *et al.* (2024), que demonstraram que a circulação de ar característica da *air fryer* intensifica a transferência de calor e massa, promovendo aumento da constante de secagem (k) e redução do tempo necessário para atingir baixos teores de umidade.

As curvas de cinética e sua adequação ao modelo de Midilli *et al.* (2002) para a secagem da muçarela na *air fryer* no modo “assar” são apresentados na Figura 36.

Figura 36 - Cinética de secagem das amostras secas na *air fryer* no modo "assar"



Fonte: Dados da pesquisa.

Confirmou-se que o aumento da temperatura reduziu expressivamente o tempo necessário para atingir baixos valores de razão de umidade, deslocando as curvas para a esquerda e aumentando sua inclinação inicial. Enquanto a secagem a 90°C apresentou redução gradual da umidade ao longo de aproximadamente 150 min, nas temperaturas de 180 e 210°C praticamente toda a água foi removida em menos

de 20 min. Esse comportamento está diretamente refletido no aumento de k e na redução de n (Tabela 14), indicando aceleração da cinética e maior intensidade da transferência de calor e massa.

A constante de secagem (k) aumentou continuamente com a elevação da temperatura, passando de 0,002043 a 90°C para 0,240151 a 210°C. Esse aumento evidencia que a temperatura exerceu forte influência sobre a velocidade de remoção de água durante a secagem em *air fryer*. Em equipamentos desse tipo, além da temperatura elevada, a circulação forçada de ar em alta velocidade aumenta o coeficiente convectivo de transferência de calor e reduz a espessura da camada limite ao redor da amostra, favorecendo simultaneamente a transferência de calor e de massa. Como consequência, ocorre redução expressiva do tempo de secagem, conforme observado nas curvas experimentais (Morales *et al.*, 2024).

Devido a isso, confirma-se o principal diferencial da *air fryer* em relação à estufa convencional, por exemplo, que é a combinação de temperaturas elevadas com circulação intensa de ar, que aumenta significativamente o coeficiente de transferência de calor e acelera a evaporação da água.

4.5.2 Modo fritar sem óleo

4.5.2.1 Umidade e atividade de água

O tempo de secagem e os resultados de teor de umidade e atividade de água das amostras de queijo muçarela secos na *air fryer* no modo “fritar sem óleo”, nas temperaturas de 90, 120, 150, 180 e 210°C são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados amostras secas na *air fryer* modo "fritar sem óleo"

TEMPERATURA (°C)	TEMPO (min)	UMIDADE (%)	ATIVIDADE DE ÁGUA
90	100	2,4894 ±1,08	0,449
120	50	1,5423 ±0,88	0,382
150	30	2,5753 ±1,18	0,400
180	25	1,4268 ±1,04	0,424
210	14	2,7616 ±0,29	0,435

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados obtidos para a muçarela seca em *air fryer* no modo ‘fritar sem óleo’ mostraram, assim como observado no modo ‘assar’, redução do tempo de

processamento com o aumento da temperatura, passando de 100 minutos a 90 °C para 14 minutos a 210 °C.

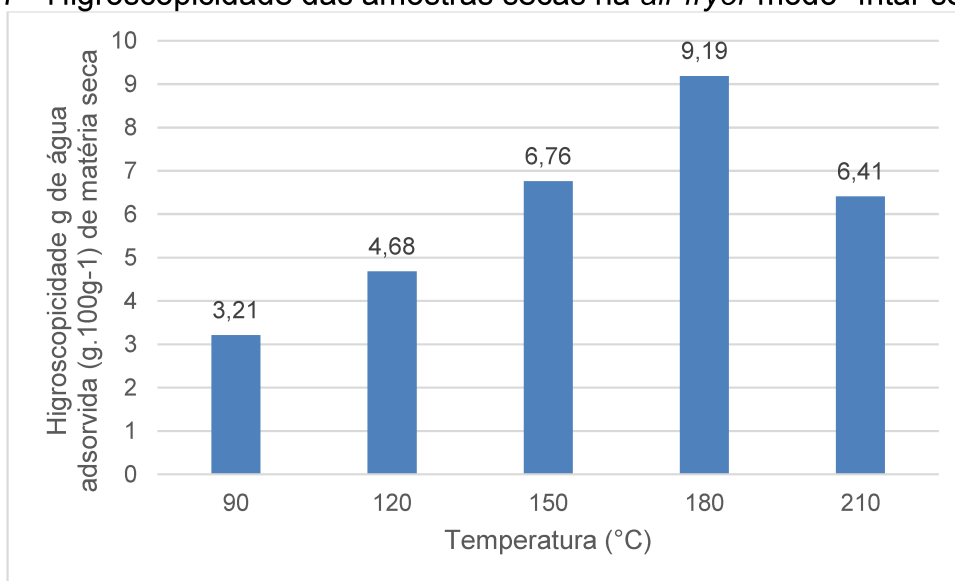
Os teores de umidade variaram de 1,43 a 2,76%, enquanto os valores de atividade de água permaneceram entre 0,382 e 0,449, atendendo aos critérios previamente estabelecidos para o processo. Notou-se, em temperaturas elevadas, a formação rápida de uma crosta superficial. Essa “crosta” é resultado do modo operacional da *air fryer*. No equipamento existe uma ventoinha responsável pela circulação do ar quente em torno da amostra de forma a imitar o movimento e o fluxo de correntes de calor produzidas numa fritadeira com óleo, produzindo douramento e uma crosta externa enquanto cozinha o interior do alimento (Morales *et al.*, 2024).

Em comparação com os resultados anteriores obtidos no modo “assar”, observa-se que o modo “fritar sem óleo” tendeu a promover secagem mais rápida em todas as temperaturas avaliadas. Por exemplo, a 210°C o tempo reduziu de 20 min no modo “assar” para 14 min no modo “fritar sem óleo” (30% de redução).

4.5.2.2 Higroscopicidade

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos na análise de higroscopicidade nas diferentes temperaturas testadas na *air fryer* no modo “fritar sem óleo”.

Figura 37 - Higroscopicidade das amostras secas na *air fryer* modo "fritar sem óleo"



Fonte: Dados da pesquisa.

A higroscopicidade aumentou progressivamente entre 90 °C e 180 °C, passando de 3,21 para 9,19 g.100g⁻¹, indicando maior capacidade de adsorção de água do ambiente nessa temperatura. Em 210 °C, por sua vez, houve redução para 6,41 g.100g⁻¹, possivelmente devido à formação de uma estrutura mais compacta causada pelo aquecimento intenso o que impactou diretamente esse parâmetro.

Comparando-se os experimentos realizados, no modo “assar”, observou-se tendência de redução da higroscopicidade com o aumento da temperatura. Já no modo fritar sem óleo ocorreu aumento expressivo da higroscopicidade até 180 °C, indicando maior tendência de absorção de umidade do ambiente. Assim, embora o modo fritar sem óleo tenha proporcionado menor tempo de processamento, o modo assar apresentou resultados mais equilibrados quanto à higroscopicidade, sugerindo melhor estabilidade físico-química do produto seco, conforme a temperatura utilizada.

4.5.2.3 Cor

Os resultados obtidos para cor obtidos na secagem no modo “fritar sem óleo” na air fryer estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados dos parâmetros de cor das amostras secas no modo fritar sem óleo da *air fryer*

TEMPERATURA (°C) / PARÂMETRO	90	120	150	180	210
L*	20,29	22,26	18,39	22,57	22,52
a*	22,74	26,54	23,44	24,24	25,17
b*	28,28	36,22	28,69	34,94	35,56
C*	36,29	44,90	37,05	42,53	43,57
h°	51,20	53,77	50,75	55,25	54,71
ΔE	80,60	80,63	82,64	79,45	79,86

Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que os valores de luminosidade (L*) variaram entre 18,39 e 22,57. O menor valor foi registrado para a amostra processada a 150°C (18,39), evidenciando maior escurecimento quando comparada aos demais tratamentos. Os valores de a* foram positivos em todas as temperaturas avaliadas, variando entre 22,74 e 26,54, o que demonstra predominância de tonalidades avermelhadas nas amostras. O maior valor foi observado a 120°C (26,54), sugerindo maior

desenvolvimento de compostos responsáveis pela coloração avermelhada durante o processamento térmico.

De forma semelhante, os valores de b^* permaneceram positivos e elevados, indicando forte presença de tonalidades amareladas. Os maiores valores foram encontrados nas temperaturas de 120°C (36,22), 180°C (34,94) e 210°C (35,56), demonstrando intensificação do amarelecimento das amostras nessas condições.

O croma (C^*), parâmetro associado à saturação ou intensidade da cor, apresentou valores entre 36,29 e 44,90. O maior valor foi registrado para a temperatura de 120°C, seguido pelas temperaturas de 210°C e 180°C. Esses resultados indicam que as amostras submetidas a essas condições apresentaram cores mais vivas e intensas, possivelmente em decorrência da concentração dos sólidos do queijo durante a secagem e da formação de pigmentos provenientes das reações térmicas. Pathare *et al.* (2013) destacam que o croma (C^*) representa a pureza ou saturação da cor, sendo comum o aumento desse parâmetro em alimentos submetidos ao processamento térmico em decorrência das modificações físico-químicas e da formação de pigmento.

Em relação ao ângulo de tonalidade (h°), os valores oscilaram entre 50,75° e 55,25°, demonstrando pouca variação entre os tratamentos. Esses resultados caracterizam uma tonalidade situada na região amarelo avermelhada do espaço de cor, indicando que a temperatura influenciou principalmente a intensidade da cor, sem alterar significativamente a tonalidade predominante das amostras.

Já os valores de diferença total de cor (ΔE) foram elevados em todas as condições analisadas, variando de 79,45 a 82,64. A maior diferença foi observada para a amostra seca a 150°C (82,64), enquanto a menor foi encontrada a 180°C (79,45). Considerando que valores de ΔE superiores a 3 já são perceptíveis visualmente, os resultados obtidos demonstram que o processo de secagem promoveu alterações extremamente significativas na aparência das amostras em relação ao material de referência.

De maneira geral, a secagem da muçarela no modo “fritar sem óleo” provocou modificações nos parâmetros de cor, caracterizadas pelo escurecimento das

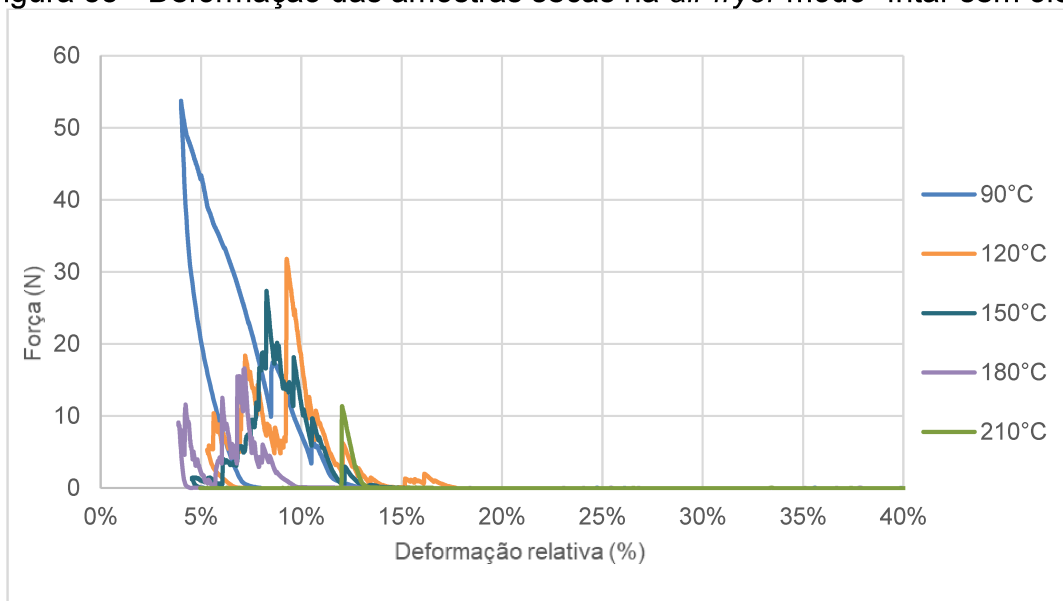
amostras, aumento das tonalidades amarela e vermelha e elevada diferença de cor em relação à amostra in natura. O tratamento a 150 °C destacou-se por promover o maior escurecimento e a maior alteração global da cor, enquanto as temperaturas de 120, 180 e 210 °C resultaram em amostras com maior intensidade colorimétrica. Esses resultados sugerem que a temperatura e tempo de secagem exercem influências significativa sobre as características visuais do produto.

Comparando os dois modos de processamento testados da *air fryer*, observa-se que as amostras submetidas ao modo “fritar sem óleo” apresentaram, de modo geral, valores de L^* inferiores ou semelhantes aos obtidos no modo “assar”. O parâmetro a^* foi superior no modo “fritar sem óleo” em praticamente todas as temperaturas, enquanto o b^* apresentou comportamento variável, com valores mais elevados no modo “assar” na maioria das condições. Consequentemente, o ângulo de tonalidade (H) apresentou maior variação no modo “assar” (51,47–55,66°), embora ambos tenham apresentado comportamento não linear com o aumento da temperatura. Os resultados sugerem que o modo “fritar sem óleo” promoveu alterações de cor ligeiramente mais intensas e maior variabilidade, possivelmente em razão das diferentes condições de transferência de calor e circulação de ar proporcionadas pelos modos de operação da *air fryer*, enquanto o modo assar apresentou comportamento mais uniforme entre as temperaturas avaliadas.

4.5.2.4 Textura – Deformação

A Figura 38 apresenta as curvas de força em função da deformação relativa obtidas por ensaio de perfuração em amostras de queijo submetidas à secagem na *air fryer* no modo “fritar sem óleo” nas temperaturas de 90, 120, 150, 180 e 210°C.

Figura 38 - Deformação das amostras secas na *air fryer* modo "fritar sem óleo"



Fonte: Dados da pesquisa.

De maneira geral, todas as amostras apresentaram aumento inicial da força seguido por quedas abruptas, evidenciando a ruptura da estrutura durante a penetração da sonda, característico de materiais frágeis, nos quais a propagação de trincas ocorre imediatamente após o limite de resistência mecânica ser atingido, resultando em sucessivas quedas na curva força-deformação (Voong *et al.*, 2019).

Os eventos de falha ocorreram principalmente entre 5% e 12% de deformação relativa, indicando uma capacidade de deformação ainda mais limitada do que aquela observada nas amostras secas no modo assar. Isso sugere a formação de estruturas mais rígidas e suscetíveis à fratura, provavelmente em decorrência da maior intensidade de transferência de calor e da rápida remoção de umidade promovida pelo modo “fritar sem óleo”. A redução do teor de água promove aumento da rigidez da matriz e favorece o comportamento frágil dos alimentos secos, uma vez que a água atua como plastificante da estrutura celular (Liu *et al.*, 2021).

A amostra processada a 90°C apresentou o maior valor de força máxima, atingindo aproximadamente 53 N. Entretanto, esse pico ocorreu em baixos níveis de deformação, próximos de 5%, demonstrando que a estrutura suportou elevadas cargas, mas apresentou ruptura precoce. Já as amostras secas a 120°C exibiram resistência intermediária, com picos próximos de 30 N e deformações de ruptura situadas entre 8% e 12%. O comportamento observado sugere uma estrutura menos

resistente do que a obtida a 90°C, porém com ligeiramente maior capacidade de acomodação da deformação antes da ruptura. Bem como sugerido por Teruel *et al.* (2015) que utilizaram a *air fryer* como método alternativo para produção de *snacks* de batata, pequenas alterações na temperatura de processamento modificam o equilíbrio entre endurecimento superficial e integridade estrutural, influenciando diretamente as propriedades mecânicas do produto.

Para as temperaturas de 150, 180 e 210°C, verificou-se redução progressiva da força máxima necessária para a perfuração. Os picos registrados permaneceram abaixo de aproximadamente 20 N, indicando enfraquecimento estrutural à medida que a temperatura aumentou. A diminuição da resistência mecânica pode estar associada ao colapso da matriz do material, ao surgimento de fissuras internas ou à degradação térmica decorrente da exposição a temperaturas mais elevadas.

Liu *et al.* (2021), ao utilizarem a *air fryer* como pré secagem de tiras de batata, demonstraram que o aumento da intensidade da secagem favorece modificações na microestrutura da crosta, aumentando a porosidade e reduzindo a resistência mecânica devido ao aparecimento de defeitos estruturais. Da mesma forma, estudos sobre alimentos fritos mostram que temperaturas elevadas promovem alterações na arquitetura dos poros e no desenvolvimento de trincas, comprometendo a integridade mecânica do produto.

A deformação relativa constitui um importante indicador da capacidade do material em suportar deformações antes da ruptura. Neste conjunto de resultados, observa-se que todas as amostras romperam em níveis inferiores a aproximadamente 12% de deformação, caracterizando materiais com baixa ductilidade e comportamento predominantemente frágil. Segundo Voong *et al.* (2019), materiais crocantes apresentam reduzida capacidade de deformação antes da ruptura, sendo essa característica diretamente relacionada à percepção sensorial de crocância e quebra.

Diferentemente do observado no modo assar, em que algumas amostras atingiram deformações próximas de 20% antes da ruptura, o modo fritar sem óleo resultou em falhas concentradas em uma faixa mais estreita e em menores deformações. Esse comportamento sugere que o processo promoveu uma secagem mais intensa da superfície, favorecendo a formação de estruturas mais quebradiças e

menos capazes de redistribuir as tensões geradas durante o ensaio de perfuração. Embora a fritura sem óleo produza alimentos com menor teor lipídico, diversos autores relatam que esse processo gera produtos com textura mais dura, seca e mecanicamente distinta daquela obtida na fritura convencional, devido às diferenças na cinética de transferência de calor e remoção de umidade (Teruel *et al.*, 2015; Gouyo *et al.*, 2020).

Além disso, a presença de múltiplos picos de menor intensidade após a ruptura inicial indica a ocorrência de fraturas sucessivas em diferentes regiões da amostra, fenômeno frequentemente associado a produtos secos com estrutura heterogênea e elevada crocância. Assim, os resultados demonstram que o modo “fritar sem óleo” produz materiais com textura mais frágil e menor capacidade de deformação quando comparados às demais amostras secas no modo “assar”.

4.4.2.5 – Cinética de secagem

A Tabela 17 apresenta os parâmetros do modelo de Midilli *et al.* (2002) estimados a partir do ajuste da equação aos dados experimentais de secagem para a muçarela seca na air fryer modo “fritar sem óleo”.

Tabela 17 - Parâmetros obtidos para o modelo de Midilli *et al.* (2002) para as amostras secas na air fryer modo "fritar sem óleo"

PARÂMETROS	k	N	A	B	R ²
90°C	-0,023436	0,856319	1,014201	-0,034964	0,9992
120°C	-0,127962	0,613507	0,985828	-0,084425	0,9990
150°C	0,003781	1,984754	0,999038	-0,008255	0,9993
180°C	-0,162091	0,245034	0,997352	-0,069582	0,9878
210°C	-0,276558	0,496706	0,992771	-0,214161	0,9934

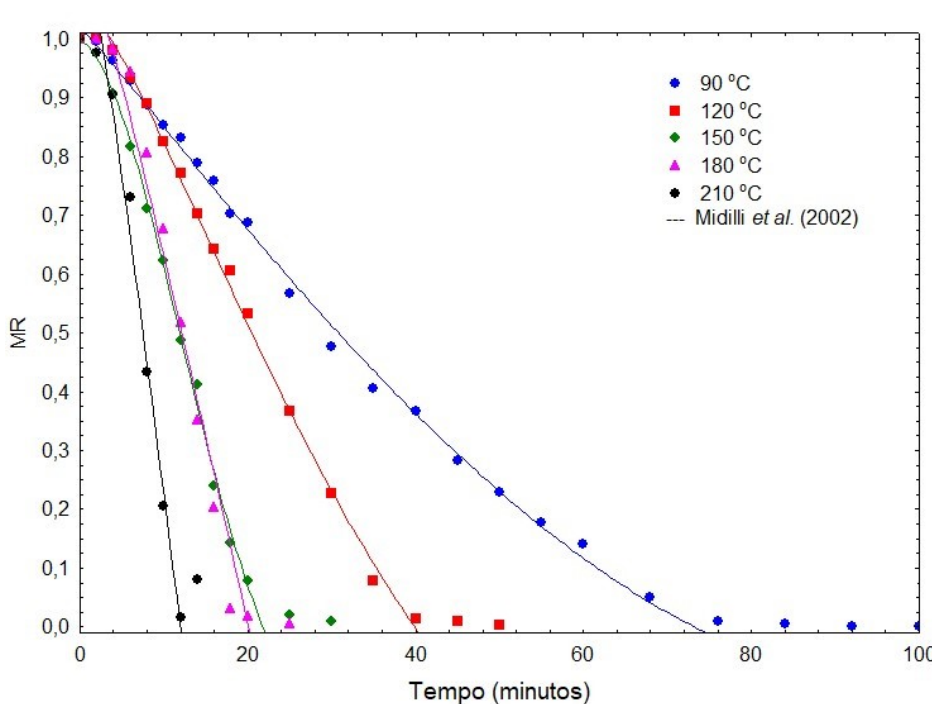
Fonte: Dados da pesquisa.

Assim como nos outros secadores estudados, o modelo de Midilli *et al.* (2002) representou adequadamente os dados experimentais, sendo que o comportamento observado está de acordo com a literatura, que demonstra aumento da difusividade efetiva da umidade com a elevação da temperatura, reduzindo significativamente o tempo de processamento. Os coeficientes de determinação (R²) variaram entre 0,9878 e 0,9993, indicando excelente qualidade de ajuste do modelo para todas as temperaturas avaliadas.

De maneira geral, os parâmetros obtidos confirmam que o aumento da temperatura promoveu maior velocidade de secagem da muçarela, reduzindo o tempo necessário para atingir baixos valores de razão de umidade. Esses resultados estão em concordância com estudos de secagem de produtos lácteos, nos quais a elevação da temperatura aumenta a constante de secagem e favorece a difusão da água no interior da matriz alimentícia. Além disso, o excelente desempenho do modelo de Midilli reforça sua adequação para descrever a cinética de secagem da muçarela em *air fryer* operando no modo de circulação de ar quente, podendo ser utilizado para fins de modelagem, otimização e dimensionamento do processo.

A Figura 39 mostra a evolução da razão do adimensional de umidade (MR) da muçarela em função do tempo para as diferentes temperaturas de secagem na *air fryer* (90, 120, 150, 180 e 210°C).

Figura 39 - Cinética de secagem em amostras secas na *air fryer* no modo "fritar sem óleo"



Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados apresentaram o comportamento esperado para alimentos de alta umidade: quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior a taxa de remoção de água e menor o tempo necessário para atingir o equilíbrio higroscópico, concordando com a teoria clássica da secagem em camada fina. Além disso, as

curvas ajustadas pelo modelo de Midilli *et al.* (2002) apresentaram excelente aderência aos dados experimentais, indicando que esse modelo descreve adequadamente a cinética observada.

A elevação da temperatura promoveu redução significativa do tempo de secagem da muçarela, evidenciada pela diminuição mais rápida da razão de umidade (MR). Enquanto a secagem a 90°C demandou aproximadamente 80–100 min para atingir o equilíbrio, a 210°C esse tempo foi reduzido para cerca de 10 min. As curvas apresentaram predominância do período de taxa decrescente, indicando que a difusão interna da água constituiu o principal mecanismo de transporte de massa.

5 COMPARATIVO ENTRE AS CONDIÇÕES DE SECAGEM

Com os resultados obtidos é possível observar que os diferentes métodos e condições de secagem do queijo muçarela exerceram influência significativa sobre parâmetros físico-químicos como teor de umidade, atividade de água, higroscopicidade, cor e deformação e apresentaram variações entre eles.

A secagem em micro-ondas demonstrou ser eficaz em desidratar as amostras em tempos bastante reduzidos, principalmente em potências mais elevadas. No entanto, a higroscopicidade elevada observada em algumas dessas condições indicou que o produto seco pode apresentar alta tendência à adsorção de umidade, o que deve ser considerado em termos de armazenamento e estabilidade do material.

No micro-ondas, a condição de 560 W, com tempo de processamento de 7 minutos, pode ser considerada a condição mais equilibrada para a secagem da muçarela entre as condições avaliadas. Nessa condição, foi obtido teor de umidade de $2,13 \pm 0,78\%$, associado a uma atividade de água de 0,421, evidenciando elevada remoção de água em um período reduzido de processamento. Além disso, o modelo de Midilli et al. (2002) apresentou excelente ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de determinação de 0,9998, confirmando a adequada representação da cinética de secagem nessa condição.

No método de secagem em estufa de circulação forçada, observou-se uma clara relação inversa entre temperatura e tempo de secagem, sendo que temperaturas mais elevadas (150°C) proporcionaram menor teor de umidade final e atividade de água em menor tempo, favorecendo a eficiência do processo. Contudo, é importante destacar que o uso de altas temperaturas pode comprometer características sensoriais e estruturais do produto, exigindo um equilíbrio entre eficiência térmica e qualidade final.

A liofilização, por sua vez, apresentou comportamento característico de um processo de secagem mais lento, porém com maior capacidade de preservação das características visuais e estruturais do queijo. Com base nos resultados obtidos, considerando conjuntamente estabilidade, tempo de processamento e características do produto, 24 h de liofilização podem ser consideradas uma condição mais equilibrada que 48 e 72 h. Outro aspecto favorável da liofilização foi a preservação da

aparência das amostras. Diferentemente dos métodos baseados em aquecimento direto, as amostras liofilizadas mantiveram características visuais mais próximas da muçarela original. Além disso, a estrutura obtida após a liofilização apresentou comportamento mecânico compatível com materiais secos, com aumento da rigidez à medida que o tempo de processamento foi prolongado.

Os experimentos realizados na *air fryer* apresentaram como principal vantagem a elevada velocidade de secagem. A comparação entre os dois modos de operação da *air fryer* demonstra que o modo “fritar sem óleo” apresentou maior velocidade de secagem, porém não necessariamente produziu o produto com melhores características de estabilidade. O modo “assar”, por outro lado, apresentou comportamento mais equilibrado entre redução da umidade, atividade de água, resistência mecânica e higroscopicidade. Assim, entre os dois modos da *air fryer*, o modo “assar” mostrou-se mais adequado para a obtenção de um produto seco com características tecnológicas mais equilibradas.

6 CONCLUSÕES

Considerando simultaneamente umidade, atividade de água, higroscopicidade, conservação da cor, características mecânicas e tempo de processamento, a liofilização por 24 h pode ser considerada o processo mais adequado entre os métodos avaliados para obtenção de muçarela desidratada com maior qualidade tecnológica. Entretanto, quando o principal critério é a rapidez e a eficiência operacional do processo, a *air fryer* no modo “assar” apresenta-se como a condição mais promissora. O micro-ondas é o método de escolha quando se pensa em secagem rápida por aquecimento volumétrico, e a estufa de circulação forçada, apesar de se apresentar entre os secadores como o maior demandante de tempo de operação, deve ser considerado como método convencional e de maior facilidade operacional.

Em síntese, os resultados demonstram que a desidratação da muçarela é tecnicamente viável por diferentes métodos, porém cada tecnologia promove modificações específicas na matriz do alimento. Os resultados obtidos contribuem para demonstrar o potencial de diferentes tecnologias de secagem na produção de muçarela desidratada, fornecendo subsídios para a seleção do método de acordo com as características desejadas para o produto final.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise sensorial da muçarela desidratada, com o intuito de avaliar a sua aplicabilidade como *snacks*;
- Caracterização da muçarela desidratada quanto a determinação de proteínas e gorduras;
- Aplicação da microscopia eletrônica de varredura (MEV) a fim de avaliar, por exemplo, o impacto da secagem, porosidade e expansão da muçarela seca;
- Aprofundamento com planejamentos experimentais das melhores condições de cada secador.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, Aqsa; NASIM, Igra; DIN, Muhammad Saeed; ARAKI, Tetsuya; KHALID, Nauman. Effects of different fat replacers on functional and rheological properties of low-fat mozzarella cheeses: A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 139, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104136>
- ANLI, Elief Ayse. Possibilities for using microwave-vacuum drying in Lor cheese production. **International Dairy Journal**, v. 102. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2019.104618>.
- ARANHA, Ana Carolina Raimundini; DEFENDI, Rafael Oliveira; JORGE, Luiz Mario de Matos. Conventional and intermittent drying modeling of agricultural products: A review. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, 2023. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14206>
- ARIMI, J.M.; DUGGAN, E.; O'SULLIVAN, M.; LYNG, J.G.; O'RIORDAN, E.D. Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread): Mechanical and acoustic evaluation. **Food Research International**, v. 43, p. 1650-1655, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.004>.
- ARPACI, Emre; ATAYILMAZ, Ozgur; GEMICI, Zafer. Exploring Mathematical Modeling and CFD in Convective Drying of Fruits and Vegetables: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, 2024. DOI: 10.1007/s11947-024-03627-2
- ATIK, Didem Sözeri; HUPPERTZ, Thom. Melting of natural cheese: A review. **International Dairy Journal**, v.142, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2023.105648>
- AYRANCI, Vasif Kubilay; MZOUGH, Mondher; SALUM, Pelin; ARPA ZEMZEMOGLU, Tuba Eda; ERBAY, Zafer. Production and Multi-Criteria Evaluation of Healthy White Cheese Snacks Using Microwave-Vacuum Drying. **Journal of Food Science**, v. 91, n. 6, 2026. DOI: 10.1111/1750-3841.71170
- BHANDARI, Bhesh; ADHIKARI, Benu. Water activity in food processing and preservation. Em: CHEN, Xiao Dong; MUJUMDAR, Arun. *Drying Technologies in Food Processing*, Cap. 2, p. 55-89, Blackwell Publishing Ltd, John Wiley & Sons, Inglaterra, 2008. DOI: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:176744>.
- BOTELHO, Fernando Mendes; GRANELLA, Suian José; BOTELHO, Silvia de Carvalho Campos; GARCIA, Taise Raquel Bechlin. Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. In: Congresso Pan-americano de Engenharia de Alimentos, 2015. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 212-219, 2015.
- BRASIL. Decreto nº 10.468, de 18 de agosto de 2020. **Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA)**. Brasília, DF: Planalto, 2020.

BRASIL. Portaria nº 146 de 07 de março de 1996. **Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Queijos**. Brasília DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 1996.

BEDIR, Tuba Büyüksırt; KULEAŞAN, Hakan. Determination of Microbial Properties of Freeze Dried Traditional Cheese. **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**, v. 7, p. 688–692, 2019. DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i4.688-692.2126>

CAI, Y. Z.; CORKE, H. Production and properties of spray dried Amaranthus betacyanin pigments. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 65, n. 6, p. 1248-1252, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x>

CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing - A review. **Food Research International**, v. 52, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>

CHEN, F., ZHANG, M., MUJUMDAR, A. S., GUO, C., YU, D. Comparative analysis of composition and hygroscopic properties of infrared freeze-dried blueberries, cranberries and raspberries. **Drying Technology**, 1-16, 2021.

CHEN, Xiao Dong; PATEL, K. C. Biological changes during food drying processes. Em: Chen, Xiao Dong; Mujumdar, Arun. *Drying Technologies in Food Processing*, Cap 3, p. 90-112, Blackwell Publishing Ltd, John Wiley & Sons, Inglaterra, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285677152_Biological_change_during_food_drying_processes.

CHUDY, Sylwia; MAKOWSKA, Agnieszka; PIATEK, Michael; KRZYWDZIŃSKA-BARTKOWIAK, Mirosława. Application of microwave vacuum drying for snack production: Characteristics of pure cheese puffs. **International Journal of Dairy Technology**, 2019. DOI: 10.1111/1471-0307.12562.

CORDEIRO, M.H.M; SILVA, J.M; MIZOBUTSI, G.P; MIZOBUTSI, E.H; MOTA, W.F. Caracterização física, química e nutricional da pitaiia-rosa de polpa vermelha. *Rev. Bras. Frutic.*, Jaboticabal -SP, 37(1), 020-026, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-046/14>

CUNHA, Leda Cristina Muzzi; MONTEIRO, Maria Lúcia Guerra; LIMA, Bruno Reis Carneiro da Costa; GUEDES, Juliana Maria; RODRIGUES, Bruna Leal; FORTUNATO, Alice Raquel; CONTE-JUNIOR, Carlos Adam. Effect of microencapsulated extract of pitaya (*Hylocereus costaricensis*) peel on oxidative quality parameters of refrigerated ground pork patties subjected to UV-C radiation. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 3, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15272>

DEZANI, Adriana Alvarenga; RETONDO, Bárbara Buosi La; WAIDEMAN, Mateus Alves. Determinantes de consumo dos produtos derivados do leite. **Revista Eletrônica de Administração**, v. 14, 2015. <http://periodicos.unifacef.com.br/rea/article/view/824>

EL-BAKRY, Mamdouh; SHEEHAN, Jeremiah Sheehan. Analysing cheese microstructure: A review of recent developments. **Journal of Food Engineering**, v. 125, p. 84–96. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877413005463>.

ELNAKER, Nancy.; DAOU, Mariane; OCHSENKÜHN, Michael; AMIN, Shady; YOUSEF, Ahmed; YOUSEF, Lina. A metabolomics approach to evaluate the effect of lyophilization versus oven drying on the chemical composition of plant extracts. **Scientific Reports**, v. 11, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02158-6>

EMBRAPA. Fabricação de Queijos e Doce de Leite. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1139971>.

EVANGELISTA, J. Tecnologia de alimentos. 2ed. São Paulo: Atheneu, 2005. 652p.

FELLOWS, P. J. Tecnologia de Processamento de Alimentos: Princípios e Prática. Tradução de Olivera et al., 2ª Edição, 602 p., Porto Alegre-RS, Ed. ARTMED, 2006.

FIKRY, Mohammad; IBRAHIM, Khalifa; ROKKAYA, Sami; EBTIHAL, Khojah; KHADIGA, Ahmed Ismail; MOKHTAR, Dabbour. Optimization of the Frying Temperature and Time for Preparation of Healthy Falafel Using Air Frying Technology. **Foods**, v. 10, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10112567>

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV). O setor de laticínios no Brasil: e suas interações com o comércio internacional. Rio de Janeiro: FGV Agro, 2023. Disponível em: https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-03/laticinios_fgv_PT.pdf.

GAO, Peng; ZHANG, Wenyuan; ZHAO, Xiaoxuan; PANG, Chen Xu, Xiaoyang; FAUCONNIER, Marie-Laure; ZHANG, Shuwen; LV, Jiaping. The effect of Maillard reaction on flavour development of protein hydrolysates from cheese. **Food Chemistry**, v. 437, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137569>.

GEA NIRO RESEARCH LABORATORY. GEA Niro analytical methods: analytical methods dry milk products, ed. 14, p. 103, 2003.

GHAITARANPOUR, Arash; KOOCHEKI, Arash; MOHEBBI, Mohebbat; NGADI, Michael O. Effect of deep fat and hot air frying on doughnuts physical properties and kinetic of crust formation. **Journal of Cereal Science**, v. 83, p. 25-31, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.006>.

GONG, B.; DUMPLER, J.; MORARU, C.I. Microwave vacuum drying of low-moisture part-skim mozzarella: Process parameters and sample geometry affect product characteristics. **Journal of Dairy Science**, v. 108, 2025. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-26335>

GONG, B.; MORARU C. I. A mechanistic, state diagram approach to understanding microwave vacuum drying and expansion of natural cheese. **LWT**, v. 233, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118515>.

GONÇALVES, Mônica Correia; CARDARELLI, Haíssa Roberta. Effect of the stretching temperature on the texture and thermophysical properties of Mozzarella

cheese. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, 2020. DOI: [10.1111/jfpp.14703](https://doi.org/10.1111/jfpp.14703).

GOUYO, Teko; MESTRES, Christian; MARAVAL, Isabelle; FONTEZ, Benedicte; HOFLEITNER, Celine; BOHUON, Philippe. Assessment of acoustic-mechanical measurements for texture of French fries: Comparison of deep-fat frying and air frying. **Food Research International**, v. 131, 2020. [//doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108947](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108947)

GUINEE, Tim. Cheese: Cheese as a Food Ingredient. **Encyclopedia of Dairy Sciences**, 2 ed., p. 833-842, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314292797_Cheese_Cheese_as_a_Food_Ingredient

GUINÉ, Raquel. The drying of foods and its effect on the physical-chemical, sensorial and nutritional properties. **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 4, p. 93 -100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijfe.4.2.93-100>

GULATI, Arunima; GALVIN, Norann; HENNESSY, Deirdre; MCAULIFFE, Stephen; O'DONOVAN, Micha; MCMANUS, Jennifer; FENELON, Mark; GUINEE, Timothy. Grazing of dairy cows on pasture versus indoor feeding on total mixed ration: Effects on low-moisture part-skim mozzarella cheese yield and quality characteristics in mid and late lactation. **Journal of Dairy Science**, v.101, n. 10, p. 8737-8756, 2018. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14566>

GULATI, Tushar; DATTA, Ashim. Mechanistic understanding of case-hardening and texture development during drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v.166, p. 119-138, 2015. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.05.031)

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz, 4. ed., São Paulo: 2008.

KARAGUL, M. S.; ALTUNTAS, B. Liyofilizasyon: Genel proses degerlendirmesi. **Etlik Veteriner Mikrobiyoloji Dergisi**, v. 29, p. 63-70, 2018. <https://doi.org/10.35864/evmd.513002>

KARTINI, Kartini; HUDA, Muhamat Bahrul; HAYATI, Zeinetta Midya; SASTIKA, Nahdya; NAWATILA, Roisah. Scaling up stirring-assisted extraction and transformation of roselle anthocyanins into dried powder using spray-drying and oven-drying. **Applied Food Research**, v. 3, 2023. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2023.100357>

KHAN, Md Imran; WELLARD, Mark; NAGY, Szilvia Anett; JOARDDER M.U.H; KARIM, M. A. Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hygroscopic food material. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 266–273, 2017.

KINDSTEDT, Paula. Symposium review: The Mozzarella/pasta filata years: A tribute to David M. Barbano. **Journal of Dairy Science**, v. 102, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/JDS.2019-17096>

KOCA, Nurcan; ERBAY, Zafer; KAYMAK-ERTEKIN, Figen. Effects of spray-drying conditions on the chemical, physical, and sensory properties of cheese powder. **Journal of Dairy Science**, v. 98, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9111>

KOPRUALAN, Ozgun; ELMAS, Feyza; BODRUK, Anil; ARIKAYA, Şeyma; KOÇ, Mehmet; KOCA, Nurcan; ERTEKIN, Figen Kaymak. Impact of pre-drying on the textural, chemical, color, and sensory properties of explosive puffing dried white cheese snacks. **LWT**, v. 154, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112665>.

KUMAR, Chandan; KARIM, Azharul. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 3, p. 379–394, 2019. DOI: 10.1080/10408398.2017.1373269.

LEWICKI, P.P. et al. Encyclopedia of meat science. 2 ed., v. 1, p. 471-479, 2014.

LIU, Ying; TIAN, Jianjun; HU, Bo; YU, Peibin; FAN, Liuping. Relationship between crust characteristics and oil uptake of potato strips with hot-air pre-drying during frying process. **Food Chemistry**, v. 360, 2021.

LUO, Jing; LI, Min; ZHANG, Ying; ZHENG, Man; LING, Chang Ming. The low-field NMR studies the change in cellular water in tilapia fillet tissue during different drying conditions. **Food Science and Nutrition**, p. 2644-2657, 2021. doi: 10.1002/fsn3.2221.

MANZOOR, Saqib; GULZAR, Nabila; INAYAT, Saima; ULLAH, Ehsan. Optimizing freeze drying conditions and enhancing quality of cheese powder flavours through surface area to volume ratio manipulation. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 35, p. 1630-1642, 2025. <https://doi.org/10.36899/JAPS.2025.6.0137>

MARTINS, Fernanda Pereira; NETO, Juan Canellas Bosch; SILVA, Alex Júnior Oliveira; SIQUEIRA, Antonio Marcos de Oliveira. Drying: a review. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, 2020. <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/11743>.

MARTINS, Vanessa Cristina; FERREIRA, Suzane Martins; CARVALHO, Vania Silva. Measuring dry extract in dairy products: Optimizing the methodology. **Ciência Rural**, v. 48, 2018. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170883>

MATERA, Juliana; LUNA, Aderval; BATISTA, Diego; PIMENTEL, Tatiana; MORAES, Juliana; KAMIMURA, Bruna; FERREIRA, Marcus Vinicius; SILVA, Hugo; MATHIAS, Simone; ESMERINO, Erick; FREITAS, Monica; RAICES, Renata; QUITÉRIO, Simone; SANT'ANA, Anderson; SILVA, Marcia; CRUZ, Adriano. Brazilian cheeses: A survey covering physicochemical characteristics, mineral content, fatty acid profile and volatile compounds. **Food Research International**, v. 108, p. 18–26. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.03.014>

MATOS, Joana D'arc Paz; FIGUEIREDO, Rossana Maria Feitosa; QUEIROZ, Alexandre José de Melo. **Liofilização e secagem em camada de espuma da polpa mista de jambolão e acerola e elaboração de iogurte concentrado**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2020. <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/28089>

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, v. 20, p. 1503-1513, 2002. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>

MONTEIRO, Ricardo; CARCIOFI, Bruno; LAURINDO, João. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 178, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.12.024>

MONTEIRO, Ricardo; LINK, Jade; TRIBUZI, Giustino; CARCIOFI, Bruno; LAURINDO, João. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 232, 1–10, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.015>

MORAES, Jaqueline; ANDREANI, Pamela; MURTA, Bernardo; LINK, Jade; TRIBUZI, Giustino; LAURINDO, João B; PAUL, Stephan; CARCIOFI, Bruno. Mechanical-acoustical measurements to assess the crispness of dehydrated bananas at different water activities. **LWT**, v.154, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112822>.

MORALES, José A. Téllez; MIRANDA, Jesus Rodríguez; GARAY, Ricardo Aguilar. Review of the influence of hot air frying on food quality. **Measurement: Food**, v.14, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.meafao.2024.100153>.

MOREIRA, Marcos Flavio Pinto. **Secagem de gel Agar**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP, 2000. <https://pergamum.ufscar.br/acervo/52672>

MUHIALDIN, Belal; KAMATH, Abhijit; LARIN, Jerry; SHI, Zhongqin; ALCARRAZ, Elizabeth. Novel applications of fresh cheddar cheese in extruded pet food snacks. **Applied Food Research**, v.6, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101799>.

MUJUMDAR, Arun S. Handbook of industrial drying. Boca Raton, 2014. <https://doi.org/10.1201/b17208>

NGAN, H. L.; IP, S. Y.; WANG, M.; ZHOU, Q. Comparative Study of Sensory and Physicochemical Characteristics of Green-Tea-Fortified Cupcakes upon Air Frying and Oven Baking. **Foods**, v. 12, n. 6, mar, 2023. [10.3390/foods12061266](https://doi.org/10.3390/foods12061266)

NOWAK, Dorota; JAKUBCZYK, Ewa. The Freeze-Drying of Foods-The Characteristic of the Process Course and the Effect of Its Parameters on the Physical Properties of Food Materials. **Foods**, v.9, 2020. DOI: [10.3390/foods9101488](https://doi.org/10.3390/foods9101488).

OUAABOU, Rachida; NABIL, Bouchra; HIDAR, Nadia; LAHNINE, Lamyae; IDLIMAM, Ali; LAMHARRAR, Abdelkader; HANINE, Hafida; MAHROUZ, Mostafa. Valorization of solar drying process in the production of dried Moroccan sweet cherries. **Solar Energy**, v. 172, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.079>

OZGEN, Filiz. Experimental investigation of drying characteristics of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.). **Heat and Mass Transfer**, v.51, p. 343-353, 2015.

PARK, Kil Jin; YADO, Maurício Kenze Moreno; BROD, Fernando Pedro Reis. Drying studies of sliced pear bartl eet (*Pyrus* sp.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 21, 2001. DOI: <https://www.scielo.br/j/cta/a/MKJFrQSJWc38mPZGjfhgpxy/?lang=pt>

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A Review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, 1985. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90116-7](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90116-7)

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, p. 36–60, 2013. DOI: 10.1007/s11947-012-0867-9.

PEDRO, Maria Angelica Marques. **Influência de encapsulantes e do método de secagem nas propriedades físico-químicas e atributos de qualidade de polpa de maracujá (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) em pó**. Tese de Doutorado, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto – SP, 2009.
<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/55adce85-2b00-4911-9512-6efa339a31df/content>

PELLICER, José Antonio; FORTEA, Maria Isabel; TRABAL, Juan; RODRÍGUEZ-LÓPEZ, Maria Isabel; GABALDÓN, José Antonio; NÚÑEZ-DELICADO, Estrella. Stability of microencapsulated strawberry flavour by spray drying, freeze drying and fluid bed. **Powder Technology**, v. 347, p. 179–185, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.03.010>

PERRY, Katia. Queijos: aspectos químicos, bioquímicos e microbiológicos. **Química Nova**, v. 27, 2004.
<https://www.scielo.br/j/qn/a/nrmhRjf7kXfPXszfrXmRh9m/?format=html&lang=pt>

RAHMAN, N. A.; RAZAK, S. Z.; LOKMANALHAKIM, L. A.; TAIP, F. S.; KAMAL, S. M. Response surface optimization for hot air-frying technique and its effects on the quality of sweet potato snack. **Journal of Food Engineering**, v. 40, 2016.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12507>

RANI, L.; Kumar, M.; Kaushik, D.; Kaur, J.; Kumar, A.; Oz, F.; Proestos, C.; Oz, E. A review on the frying process: Methods, models and their mechanism and application in the food industry. **Food Research International**, 2023.
[10.1016/j.foodres.2023.113176](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113176)

RITA, Ana; ASSIS, Fernanda; PERES, Ana Paula; PINTADO, Manuela; MORAIS, Alcina. Dehydration of cheese by hot air, microwave and freeze-drying. Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry, 18(4), 455-460, 2017. <http://hdl.handle.net/10400.14/26014>

ROMANO, Roberto César de Oliveira; BERNARDO, Heitor Montefusco; DANTAS, Sérgio Roberto Andrade; CINCOTTO, Maria Alba; PILEGGI, Rafael Giuliano. Influência da utilização de diferentes teores de lama vermelha nas propriedades de ladrilhos hidráulicos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 647-659, jul./set. 2020.

SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S. Fundamentals of Food Dehydration. Em: HUI, Y. H.; CLARY, C.; FARID, M. M.; FASINA, O. O.; NOOMHORM, A.; WELTI-CHANGES, J. **Food Drying Science and Technology**, Cap. 1, p. 1-42, DeStech Publication, Inc, Lancaster-EUA, 2008. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300450>

SALES, D. C.; RANGEL, A. H. N.; URBANO, S. A.; et al. Relationship between mozzarella yield and milk composition, processing factors, and recovery of whey constituents. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 6, p. 4308–4321, 2017. DOI: 10.3168/jds.2016-12392.

SCHMIEDESKAMP, Amy; SCHREINER, Monika; BALDERMANN, Susanne. Impact of Cultivar Selection and Thermal Processing by Air Drying, Air Frying, and Deep Frying on the Carotenoid Content and Stability and Antioxidant Capacity in Carrots (*Daucus carota* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 70, 2022. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.jafc.1c05718>

SEERANGURAYAR, T.; MANICKAVASAGAN, A.; AL-ISMAILI, Abdulrahim; AL-MULLA, Yaseen. Effect of carrier agents on physicochemical properties of foammat freeze-dried date powder. **Drying Technology**, v. 36, n. 11, p. 1292-1303, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2017.1400557>.

SIDDIQUI, Anusha; SHRESTHA, Pratiksha; AWAD, Nour; MORTAS, Mustafa; POVETKIN, Sergey Nikolaevich; PHATARE, Pankaj. A Review on Textural Quality Analysis of Dried Food Products. **Food Reviews International**, v. 40, p. 1854–1874, 2023. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2238071>

SILVA, Fernando Teixeira. Queijo muçarela. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165354/1/AG-FAMILIAR-Queijo-mussarela-2ed-LR.pdf>

SILVA, Sérgio Henrique; NEVES, Isabelle Cristina Oliveira; MEIRA, Ana Cristina Freitas de Oliveira; ALEXANDRE, Ana Cláudia Silveira; OLIVEIRA, Natália Leite; RESENDE, Jaime Vilela. Freeze-dried Petit Suisse cheese produced with ora-pro-nóbis (*Pereskia aculeata* Miller) biopolymer and carrageenan mi. **LWT**, v.149, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111764>

SIMÃO, Raquel; SOUZA, Paula; MONTEIRO, Ricardo; ANDRADE, Cristiano; LAURINDO, João; CARCIOFI, Bruno. Mozzarella cheese snacks produced by microwave vacuum drying: Protein profile, protein digestibility, flavor, and texture. **Food Chemistry**, v. 478, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143660>

TAKMA, Dilara Konuk; OKAY, Utku; GUNES, Ummu. Characteristics of freeze-dried white cheese powder and utilisation in bread formulation. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, p. 4958–4969, 2024. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17229>

TERUEL, M.R.; GORDON, M.; LINARES, M.B.; GARRIDO, M.D.; AHROMRIT, A.; NIRANJAN, K. A Comparative Study of the Characteristics of French Fries Produced by Deep Fat Frying and Air Frying. **Journal of Food Science**, v.80, p.349-358, 2015. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12753>

TUNICK, Michael. Activation energy measurements in rheological analysis of cheese. **International Dairy Journal**, v. 20, p. 680–685, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2010.03.010>

VOGT, Sarah; SMITH, Jeremy; SEYMOUR, Joseph; CARR, Alistair; GOLDING, Matt; CODD, Sarah. Assessment of the changes in the structure and component mobility of Mozzarella and Cheddar cheese during heating. **Journal of Food Engineering**, v. 150, p. 35–43, 2015.

<https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2014.10.026>

VOONG, Kha Yiu; WELCH, Abigail

Norton; MILLS, Thomas; NORTON, Ian. Understanding and predicting sensory crispness of deep-fried battered and breaded coatings. **Journal of Texture Studies**, v. 50, p. 456–464, 2019. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12456>

YILDIRIM, Ebru; YALÇINER, Celal Can; YILMAZ, İlkay. Lyophilization and Sensory Analysis of Traditional Artisan Turkish Cheeses. **International Journal of Gastronomy Research**, v. 4, p. 20–33, 2025. <https://doi.org/10.56479/ijgr-48>

ZAREIN, Mohammad; SAMADI, Seyed Hashem; GHOBADIAN, Barat. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. **Journal of Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, p. 41–47, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.06.002>

ZENG, Zhiheng; HAN C; WANG, Qi; YUAN, Huilin; Zhang, Xuefeng; LI, Bin. Analysis of drying characteristics, effective moisture diffusivity and energy, exergy and environment performance indicators during thin layer drying of tea in a convective-hot air dryer. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 2024. doi: 10.3389/fsufs.2024.1371696

ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A.S; WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends Food Science Technology**, v.17, p. 524–534, 2006. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2006.04.011>

ZOU, Kejian; TENG, Jianwen; HUANG, Li; DAI, Xinwei; WEI, Baoyao. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT-Food Science and Technology**, v.51, p. 253–259, 2013. [10.1016/j.lwt.2012.11.005](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.005)