



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTUDO DA CASEÍNA COMO AGENTE ESPUMANTE NA SECAGEM DE TOMATE PELO MÉTODO *FOAM-MAT*

Emanuelle Maria de Oliveira Paiva

Orientadora: Prof^ª. Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Co-Orientadora: Prof^ª. Dra. Thayse Naianne Pires Dantas

Natal/RN

Julho de 2022

Emanuelle Maria de Oliveira Paiva

ESTUDO DA CASEÍNA COMO AGENTE
ESPUMANTE NA SECAGEM DE TOMATE PELO
MÉTODO *FOAM-MAT*

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros e coorientação da Prof.^a Dr.^a Thayse Naianne Pires Dantas.

Natal/RN

Julho/2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas – SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Paiva, Emanuelle Maria de Oliveira.

Estudo da caseína como agente espumante na secagem de tomate pelo método foam-mat / Emanuelle Maria de Oliveira Paiva. - 2022.

104f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, 2022.

Orientadora: Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros.

Coorientadora: Dra. Thayse Naianne Pires Dantas.

1. Caseína - Dissertação. 2. Foam-mat - Dissertação. 3. Tomate - Dissertação. I. Medeiros, Maria de Fátima Dantas de. II. Dantas, Thayse Naianne Pires. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 66.0

Elaborado por Raimundo Muniz de Oliveira - CRB-15/429

RESUMO

As frutas em pó apresentam grande potencial de aplicação em produtos saudáveis, pois concentram nutrientes e vitaminas essenciais para o funcionamento do sistema imunológico. Os pós de frutas são obtidos por métodos de secagens diversos, e um deles é o método camada de espuma, no qual o material é submetido a incorporação de ar para formação de uma espuma. Na preparação da espuma é comum o uso de ingredientes como agentes espumantes e emulsificantes, que auxiliam tanto na formação como na estabilidade da espuma. O ingrediente com propriedade espumante deste estudo é a caseína, uma proteína natural obtida a partir da coagulação do leite desnatado, que agrega valor nutricional ao produto final obtido. O processo de extração da caseína foi a coagulação por meio da adição da renina microbiana. A caseína é transformada em espuma após o batimento. Posteriormente a polpa de tomate é incorporada e submetida novamente a batimento em batedeira planetária. Os experimentos foram conduzidos com base em um delineamento experimental fatorial do tipo 2^3 . As espumas foram formadas a partir da polpa de tomate (sem cozimento, com 10 e 20 minutos de cozimento), com diferentes proporções de polpa (50, 60 e 70%), e foram submetidas a secagem em estufa de circulação de ar com temperatura controlada (60, 70 e 80°C) até atingir peso constante. Foram obtidas as curvas de secagem, sendo identificado um importante período de taxa constante em todos os experimentos. Os dados experimentais foram ajustados a modelos matemáticos semiempíricos e fenomenológicos. O modelo que melhor representou a cinética de secagem das espumas foi o de Midilli por apresentar melhor R^2 e teste de Akaike mais negativo. Os pós obtidos apresentaram umidade e atividade de água compatíveis, com maior valor de 2,68% para umidade e 0,367 para atividade de água, estando em condições favoráveis para o armazenamento e conservação. Todavia, os pós se mostraram higroscópicos. Definiu-se um tempo de secagem suficiente para os pós atingirem uma umidade de 0,04 g/g de sólido, estimado pelo modelo de Midilli, como variável resposta do planejamento experimental junto com a higroscopicidade. A partir da análise dos resultados do planejamento experimental foram encontrados modelos significativos e preditivos para representar ambas as variáveis respostas. Empregando a função desejabilidade e analisando simultaneamente as variáveis dependentes de tempo para atingir a umidade de 0,04 g/g de sólido e a higroscopicidade, a condição ótima para minimização das variáveis e obtenção dos melhores resultados em uma análise conjunta

ocorre na condição de tempo de cozimento 0 minutos (polpa de tomate cru) com 50% de concentração de polpa e temperatura de secagem de 65 °C.

Palavras-chave: caseína, *foam-mat*, tomate.

ABSTRACT

Fruit powders have great potential for application in healthy products, because they concentrate nutrients and vitamins essential for the functioning of the immune system. Fruit powders are obtained by various drying methods, one of them being the foam layer method, in which the material is subjected to air incorporation to form a foam. In preparing the foam, it is common to use ingredients with foaming and emulsifying properties, which aid in both the formation and stability of the foam. The ingredient with foaming property in this study is casein, a natural protein obtained from the coagulation of skim milk, which adds nutritional value to the final product obtained. The casein extraction process was coagulation by adding microbial rennin. The casein is transformed into foam after the beating. Afterwards the tomato pulp is incorporated and subjected again to beating in a planetary mixer. The experiments were conducted based on a 2^3 factorial experimental design. The foams were formed from tomato pulp (without cooking, with 10 and 20 minutes of cooking), with different proportions of pulp (50, 60 and 70%), and were submitted to drying in an air oven with controlled temperature (60, 70 and 80°C) until reaching a constant weight. Drying curves were obtained, and an important period of constant rate was identified in all experiments. The experimental data were fitted to semiempirical and phenomenological mathematical models. The model that best represented the drying kinetics of the foams was the Midilli model for presenting the best R^2 and the most negative Akaike test value. The powders obtained showed compatible humidity and water activity, with the highest value of 2.68% for humidity and 0.367 for water activity, being in favorable conditions for storage and preservation. However, the powders showed to be hygroscopic. A drying time sufficient for the powders to reach a humidity content of 0.04 g/g of solid, estimated by the Midilli model, was defined as the response variable of the experimental planning along with hygroscopicity. From the analysis of the experimental planning results, significant and predictive models were found to represent both response variables. Employing the desirability function and simultaneously analyzing the dependent variables of time to reach the humidity content of 0.04 g/g of solid and hygroscopicity, the optimal condition for minimizing the variables and obtaining the best results in a joint analysis occurs in the condition of cooking time 0 minutes (raw tomato pulp) with 50% pulp concentration and drying temperature of 65 °C.

Keywords: casein, foam-mat, tomato.

*Dedico este trabalho
a Deus e à minha família, por todo
suporte, apoio e amparo todos os dias.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por todo amparo e suporte nos momentos de glória e de luta em minha vida, e por me permitir realizar mais um sonho.

À minha família, que é a minha base de tudo e sempre me incentivou e me mostrou que o melhor caminho para seguir seria através da minha dedicação nos estudos.

À minha madrinha, que é minha torcedora fiel e que me proporciona todo suporte que preciso.

Ao meu noivo, que me auxiliou de todas as formas para a concretização desse sonho e que sempre me incentiva na minha carreira.

Aos meus amigos de verdade, que estavam sendo suporte e se fazendo presente, seja perto ou longe, nos dias que mais precisei.

Aos meus colegas e amigos da engenharia química que contribuíram para minha formação não só como engenheira, mas como pessoa.

À minha orientadora Fafá, a flor mais querida desse departamento, a quem eu devo meus agradecimentos mais sinceros por sempre estar disponível para me auxiliar, me aconselhar e me orientar da melhor forma. Pessoas como Fafá fazem o mundo ser melhor e mais alegre.

À minha coorientadora Thayse por não medir esforços em estar disponível sempre que podia, que se dedicou a esse projeto e me auxiliou demais.

Aos Professores Marcelo e Eduardo, por participarem da minha banca e me ajudarem com tantas sugestões positivas para esse trabalho.

Aos colegas Ana Beatriz e Dario que estiveram presentes comigo no laboratório em grande parte dos meus experimentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse sonho em minha vida, meu muito obrigada, de coração.

A UFRN, PPGEQ e CAPES por tornarem possível esta pesquisa.

SUMÁRIO

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1	Objetivo Geral	18
2.2	Objetivos Específicos.....	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Tomate	20
3.2	Secagem	22
3.2.1	Secagem por camada de espuma.....	26
3.2.2	Influência dos ingredientes espumantes no método camada de espuma	27
3.3	Leite e caseína	29
3.4	Extração da caseína.....	33
3.5	Capacidade espumante e estabilidade	34
3.6	Modelos matemáticos.....	35
3.6.1	Otimização dos modelos	38
3.6.2	Função de desejabilidade.....	39
4.	METODOLOGIA.....	42
4.1	Fluxograma geral da metodologia.....	42
4.2	A coagulação do leite	43
4.3	Preparação da espuma.....	44
4.3.1	Adição de estabilizante.....	45
4.4	Secagem das espumas.....	45
4.5	Planejamento experimental.....	45
4.6	Caracterização da polpa, caseína e espuma	46
4.6.1	Densidade da polpa, caseína e espuma	46
4.6.2	Umidade da polpa e caseína	47
4.6.3	Sólidos totais da polpa e caseína	47
4.6.4	Sólidos solúveis da polpa e caseína.....	47
4.6.5	Potencial hidrogeniônico.....	48
4.6.6	Expansão da espuma.....	48
4.6.7	Umidade da espuma	48
4.6.8	Volume drenado da espuma	49

4.6.9	Porosidade da espuma	50
4.7	Caracterização dos pós.....	50
4.7.1	Umidade	50
4.7.2	Atividade de água.....	50
4.7.3	Higroscopicidade	51
4.8	Tratamento de dados.....	51
4.8.1	Modelos matemáticos.....	52
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1	Caracterização das polpas.....	54
5.2	Extração da caseína.....	55
5.3	Separação e caracterização da caseína.....	57
5.4	Testes iniciais e caracterização das espumas.....	58
5.6	Secagens pelo método camada de espuma.....	63
5.7	Ajustes dos modelos matemáticos	67
5.8	Caracterização dos pós obtidos.....	79
5.9	Avaliação dos resultados de acordo com o planejamento fatorial.....	82
5.10	Função de desejabilidade.....	87
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

Lista de Figuras

Figura 1 – Diferentes estágios de maturação do tomate.....	21
Figura 2 – Tipos de secadores quanto ao modo de operação	23
Figura 3 – Curvas de secagem	24
Figura 4 – Secagem por camada de espuma.....	27
Figura 5 – Estrutura da micela de caseína obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura na escala representativa de 200 nm.....	32
Figura 6 – Representação da coagulação do leite. a) micelas com revestimento intacto; b) remoção parcial da k-caseína; c) remoção final da k-caseína e início da agregação micelar.....	33
Figura 7 – Leite desnatado.....	43
Figura 8 – Renina microbiana.....	44
Figura 9 – Balança de medição de umidade.....	49
Figura 10 – Volume drenado	50
Figura 11 – Caseína formada.....	56
Figura 12 – Tentativa de separação da caseína.....	57
Figura 13 – Influência do tempo de batimento na densidade da espuma.....	59
Figura 14 – Influência do tempo de batimento na expansão.....	60
Figura 15 – Porosidade da espuma em função do tempo de batimento nas diferentes porcentagens de polpa de tomate cru.....	61
Figura 16 – Espuma da caseína pura.....	63
Figura 17 – Espuma da caseína com polpa 50% de tomate cru.....	63

Figura 18 – Curvas das cinéticas de secagem para as polpas de tomate (cru ou 0 minutos de cozimento, com 10 e 20 minutos de cozimento) com 50% de polpa (a), 60% de polpa (b) e 70% de polpa (c) em diferentes condições de secagem. Curvas das taxas de secagem (dX/dt) pela umidade para as polpas de tomate (cru, com 10 e 20 minutos de cozimento) com 50% de polpa (d), 60% de polpa (e) e 70% de polpa (f) em diferentes condições de secagem.....	64
Figura 19 – Aplicação do modelo de Midilli para tomate cru nas condições de 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d) da Tabela 4.....	73
Figura 20 – Aplicação do modelo de Midilli para tomate com 10 minutos de cozimento nas réplicas do ponto central, 5 (a), 6 (b) e 7 (c).....	75
Figura 21 – Aplicação do modelo de Midilli para tomate com 20 minutos de cozimento nas condições de 8 (a), 9 (b), 10 (c) e 11 (d) da Tabela 4.....	77
Figura 22 – Pós obtidos nos 11 experimentos de secagem de acordo com as condições detalhadas na Tabela 4.....	82
Figura 23 – Gráficos de Pareto para as variáveis respostas tempo para atingir a umidade desejada (0,04 em base seca) calculados pelo modelo de Midilli e higroscopicidade dos pós.....	84
Figura 24 – Valores preditos versus observados para as variáveis dependentes.....	86
Figura 25 – Superfícies respostas obtidas para t_{Mid} (a) e higroscopicidade (b).....	87
Figura 26 – Função de desejabilidade aplicada as variáveis.....	88

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Concentrações das proteínas do leite.....	31
Tabela 2 – Modelos matemáticos.....	38
Tabela 3 – Avaliação da desejabilidade por Harrington.....	40
Tabela 4 – Planejamento experimental 2³ com descrição das variáveis independentes.....	46
Tabela 5 – Classificação da higroscopicidade	51
Tabela 6 – Análises físico-químicas nas polpas.....	54
Tabela 7 – Testes de coagulação da caseína.....	55
Tabela 8 – Análises na caseína	58
Tabela 9 – Expansão da espuma de polpa de tomate cru pelo método descrito por Santos (2022)	62
Tabela 10 – R², RQMR e parâmetros para os modelos matemáticos aplicados.....	67
Tabela 11 – Resultados do critério de Akaike.....	70
Tabela 12 – Tempo pelo modelo de Midilli para atingir 4% de umidade final.....	79
Tabela 13 – Análises físico-químicas nos pós.....	79
Tabela 14 – Variáveis independentes e dependentes.....	83
Tabela 15 – Teste F para as variáveis dependentes.....	85

Capítulos 1 e 2

Introdução e Objetivos

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por finalidade ampliar a pesquisa sobre desidratação de polpas de frutas empregando-se a técnica de secagem em camada de espuma (*foam-mat*) na produção de polpa de tomate em pó. Essa técnica promove uma secagem rápida de alimentos líquidos como sucos e polpas de frutas, a partir da formação de uma espuma estável com o auxílio de ingredientes com propriedades espumantes e estabilizantes. Vem sendo utilizado na produção de alimentos em pó, em especial alimentos viscosos com altos índices de açúcares e sensíveis à tratamentos térmicos (RAJKUMAR *et al.*, 2007).

De uma forma geral, o processo se divide em três etapas, transformação do alimento líquido ou pastoso em espuma, espalhamento da espuma em uma superfície perfurada ou não, e a desidratação, que tem como resultado um produto poroso e quebradiço, facilmente transformado em pó (SOUZA, 2011).

A estrutura porosa é responsável pelo aumento nas taxas de transferência de calor e massa, fazendo com que o processo de secagem seja mais rápido e conduzido em baixas temperaturas. Temperaturas baixas e menor tempo de exposição do material são condições que se adequam à secagem de materiais termicamente sensíveis como polpas de frutas, uma vez que pode manter a preservação de seus valores bioativos e nutricionais (SOUZA, 2011).

Contudo, o processo apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de uma grande área de superfície de secagem para atender volumes altos de produção, elevando o custo de operação. Além disso, os ingredientes com propriedades espumantes empregados para formação da espuma podem comprometer tanto as características sensoriais como a qualidade do produto final, assim, muitos tem sua concentração controlada pela ANVISA. Nesse cenário, a busca por agentes espumantes que incorporem qualidade ao produto desidratado no que se refere tanto ao sabor como ao valor nutricional tem sido objeto de muitas pesquisas.

Apesar das desvantagens citadas, a secagem em camada de espuma é um processo simples e de baixo custo de operação e manutenção, que tem como resultado pós com características bem conservadas. Vários estudos tem sido realizados por pesquisadores da Base de Pesquisa em Alimentos da UFRN, dentre os quais pode-se destacar a secagem de

polpa de graviola e de banana verde e madura (GURGEL, 2014, 2019), ameixa (ELPÍDIO, 2021), e polpa de coco verde (OLIVEIRA, 2019).

Para formação da espuma existe no mercado vários ingredientes com propriedades espumantes, como a albumina e o Emustab®, muito utilizados nesse tipo de secagem. No entanto, há outros ingredientes não tão comuns que também possuem potencial para serem aplicados nesse processo, como por exemplo a caseína do leite. A caseína é uma proteína presente no leite, extraída por meio da coagulação do mesmo, e que possui uma alta capacidade de expansão.

No presente estudo a caseína foi utilizada como ingrediente com propriedades espumantes, uma vez que suas características favorecem uma organização na interface líquido-gás, facilitando o desenvolvimento de bolhas de ar e formação da espuma. Além de formar a espuma, por se tratar de uma proteína do leite com composição nutricional rica, a caseína agrega valor alimentício aos pós obtidos por esse método de secagem.

Em relação ao tomate, o mesmo foi escolhido por ser uma fruta com diversos nutrientes, mas que possui alta perecibilidade, sendo importante sua conservação como produto desidratado, com boa aceitação no mercado consumidor. Por ser rico em licopeno, poderoso antioxidante que combate os radicais livres, o fruto possui elevado consumo. O elevado teor de licopeno presente nesse fruto o torna um fruto medicinal, que fortalece o sistema imunológico (JUNIOR, 2012).

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) é um dos frutos mais produzidos no Brasil, e grande parte de sua produção é para ser consumido na forma in natura. No entanto, a produção de tomate destinado a indústria vem crescendo consideravelmente. Góias, São Paulo e Minas Gerais estão entre os maiores produtores nacionais dessa hortaliça (SOUZA *et al.*, 2011).

O fruto possui sabor atrativo e consideráveis teores de vitaminas A, B e minerais importantes para a funcionalidade do organismo, como por exemplo fósforo e o potássio. Também é rico em ácidos fólicos, cálcio e frutose. A presença de potássio no mesmo ajuda a controlar a pressão arterial e atua na prevenção de doenças cardiovasculares. O tomate contém vitamina K1, que tem importância na saúde dos ossos e vitamina C, com potencial antioxidante.

Em termos de composição nutricional, a cada 100 g de parte comestível do tomate, o mesmo apresenta 15 kcal de energia, 95,1% de umidade, 1,1 g de proteína, 0,2 g de lipídeos, 3,1 g de carboidratos, 1,2 g de fibra alimentar, 0,5 g de teor de cinzas, 7 mg de cálcio, 11 mg de magnésio, 222 mg de potássio, 0,1 mg de zinco e 21,2 mg de vitamina C (TACO, 2011).

Ao ser combinado com a caseína poderá ser comercializado tanto na forma de pó como agregado a molhos e produtos da indústria de laticínios, como por exemplo na produção de queijos, requeijão e patês. Na indústria alimentícia há a inserção de diversos produtos que a longo prazo podem trazer consequências indesejadas a saúde dos consumidores, assim, é de extrema importância buscar produtos que possam ser comercializados legalmente e que possuam ingredientes e compostos saudáveis, que tragam benefícios e nutrientes agregados.

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos. No capítulo 2 consta os objetivos gerais e específicos que se pretende alcançar com a realização do presente estudo. No capítulo 3 apresenta-se a revisão bibliográfica que aborda as características do tomate e de ingredientes com propriedades espumantes fundamentação teórica do processo de secagem, incluindo os modelos matemáticos e técnicas de otimização. No capítulo 4 é detalhada a metodologia escolhida como padrão para obtenção dos pós de tomate a partir dos testes preliminares, bem como as análises realizadas. No capítulo 5 são exibidos e discutidos todos os resultados obtidos e no capítulo 6 as conclusões e considerações finais com base nestes resultados. No capítulo 7 apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros .

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo geral estudar a secagem de polpa de tomate vermelho maduro em camada de espuma utilizando a caseína como ingrediente com propriedade espumante, avaliando-se o desempenho do processo e características dos pós a partir de diferentes condições experimentais e porcentagens de polpa.

2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral os seguintes objetivos devem ser alcançados:

- (i) Caracterizar as polpas de tomate sem e com cozimento por 10 e 20 minutos;
- (ii) Obter a caseína por coagulação com a ação da renina microbiana e realizar a caracterização físico-química com análise de umidade, sólidos totais, sólidos solúveis e massa específica.
- (iii) Monitorar o batimento da caseína com avaliação da densidade e expansão da espuma. Definir a melhor condição de batimento, os percentuais de polpa e forma de incorporação da polpa a espuma.
- (iv) Monitorar as curvas de secagem para diferentes temperaturas e porcentagens de polpa, avaliando-se a perda de umidade em função do tempo de acordo com o delineamento experimental;
- (v) Ajustar modelos de secagem aos dados experimentais e definir o que melhor se ajusta os dados da cinética de secagem;
- (vi) Realizar a análise estatística dos resultados dos ensaios e otimização das condições de operação, relativas ao tempo de cozimento, características do pó e tempo de secagem;

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tomate

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) é uma das hortaliças mais produzidas no Brasil, onde grande parte de sua produção é para ser consumido na forma *in natura*. No entanto, a produção de tomate destinado a indústria vem crescendo consideravelmente. Goiás, São Paulo e Minas Gerais estão entre os maiores produtores nacionais dessa hortaliça (SOUZA *et al.*, 2011). Segundo o Coelho (2010), a produção de tomate no Brasil é de cerca de 3,8 milhões de toneladas/ano, das quais 65% representa o consumo *in natura* e 35% o processamento industrial.

É um fruto muito consumido, tanto na preparação de molhos como sucos e saladas. Possui sabor atrativo e contém vitaminas A, B, C, K1 e minerais importantes para a funcionalidade do organismo, como por exemplo fósforo e o potássio. Também é rico em ácidos fólicos, cálcio e frutose.

O elevado consumo do tomate também se justifica por ser uma das maiores fontes de licopeno, poderoso antioxidante que combate os radicais livres, retarda o envelhecimento e pode proteger contra o câncer. O teor de licopeno presente nesse fruto o torna um fruto medicinal, que fortalece o sistema imunológico (JUNIOR, 2012). Outro ponto importante sobre a presença do licopeno no tomate é que sua absorção é melhor realizada no nosso organismo quando os produtos do tomate são ingeridos com azeite de oliva (COELHO, 2010).

Segundo Ferreira *et al.* (2004), pela legislação vigente (BRASIL, 1995) e com a proposta no Anexo XVII da Portaria Brasil SARC nº 085/02 do MAPA (BRASIL, 2002), o tomate pode ser classificado em grupos, subgrupos, classes ou calibres, tipos ou grau de seleção. Quanto ao formato, pode ser oblongo ou redondo, a depender do tamanho do diâmetro longitudinal (BRASIL, 1995).

Ainda pela portaria mencionada no parágrafo anterior o estágio de maturação pode classificar o tomate de coloração vermelha, em cinco subgrupos: verde maduro, pintado, rosado, vermelho e vermelho maduro. O processo de avaliação da cor normalmente é feito de maneira visual, no entanto também pode ser mecanizado. A Figura 1 mostra os diferentes estágios de maturação do tomate, do verde maduro ao vermelho maduro, da direita para esquerda.

Figura 1: Diferentes estágios de maturação do tomate.



Fonte: Canal do Horticultor (2021).

De acordo com Coelho (2010), na classificação dos produtos a cor é um parâmetro essencial, devendo o fruto apresentar cor vermelho-intensa e uniforme, na região externa e interna. Teores de licopeno na faixa de 5 a 8 mg/100 gramas de polpa são presentes em tomates com boa coloração.

O tomate é altamente perecível, sendo necessário realizar a aplicação de técnicas de conservação na pós-colheita para reduzir suas perdas e agregar valor (CAMARGO *et al.*, 2007). Uma dessas opções é a desidratação, produzindo o tomate seco, que é um produto bastante consumido no mercado para substituir o tomate *in natura*. A desidratação do tomate possibilita a aplicação do mesmo em diversos produtos, como catchups, molhos, extratos e outros, além de aumentar o tempo de vida útil, permitindo seu consumo mesmo na entre-safra, aumentando sua disponibilidade o ano todo.

Coelho (2010) na secagem de tomate em camada delgada, obteve amostras com umidade final abaixo dos 13% em base úmida, sendo a condição mais adequada de operação para a secagem de tomate em camada delgada com escoamento paralelo do ar a temperatura de 60°C e espessura de 3 mm.

Nicolini *et al.* (2018) ao realizar uma revisão sobre desidratação osmótica em tomates, concluiu que o pré-processamento osmótico apresenta inúmeras vantagens ao produto final, podendo inibir o escurecimento enzimático, conservar a cor natural, reter componentes voláteis, preservar o sabor do alimento e características sensoriais.

A aplicação do tomate seco em queijos foi analisada por Alves (2016), no desenvolvimento e avaliação de queijo tipo muçarela nozinho com tomate seco e

manjeriço desidratado, obtendo um produto com condições adequadas e microbiologicamente seguro, com prazo de validade de 63 dias úteis, sendo bem aceito na análise sensorial.

Bez *et al.* (2015) elaboraram e caracterizaram um requeijão cremoso com adição de tomate seco, obtendo uma formulação final com uma concentração de 2% de tomate seco que apresentou 96,7% de aceitação no seu primeiro dia. Os autores observaram que o pH diminuiu com o aumento das concentrações de tomate seco nos requeijões, sugerindo ser devido ao próprio pH do fruto adicionado.

É importante se observar que os trabalhos de secagem de tomate se referem mais a produção de tomates secos em pedaços e que a produção do pó de tomate a partir de técnicas específicas, como leito de jorro, leito fluidizado e por atomização em secadores spray ainda é pouco estudada.

3.2 Secagem

Secagem é a remoção de líquido que ocorre em um meio para a retirada de umidade do mesmo. É uma operação antiga, usada em muitos processos industriais, mas que possui complexidade em seus fenômenos físicos, como transferência de calor, massa e quantidade de movimento (NÓBREGA, 2012).

De um modo geral, o controle da secagem de um material úmido é mantido tanto pelo mecanismo interno do escoamento do líquido, como por exemplo difusão em sólidos homogêneos e escoamento capilar em materiais granulares e porosos, quanto pela resistência da camada limite ou condições externas, como por exemplo condições do ar e velocidade de secagem.

A secagem promove uma série de benefícios, pois preserva os alimentos, aumenta a vida útil dos produtos e reduz custos no transporte e armazenamento dos mesmos. A secagem possibilita uso dos produtos em entressafas, tornando-os disponíveis em qualquer período. Também é considerada uma proteção contra a degradação enzimática (MARTINS *et al.*, 2020).

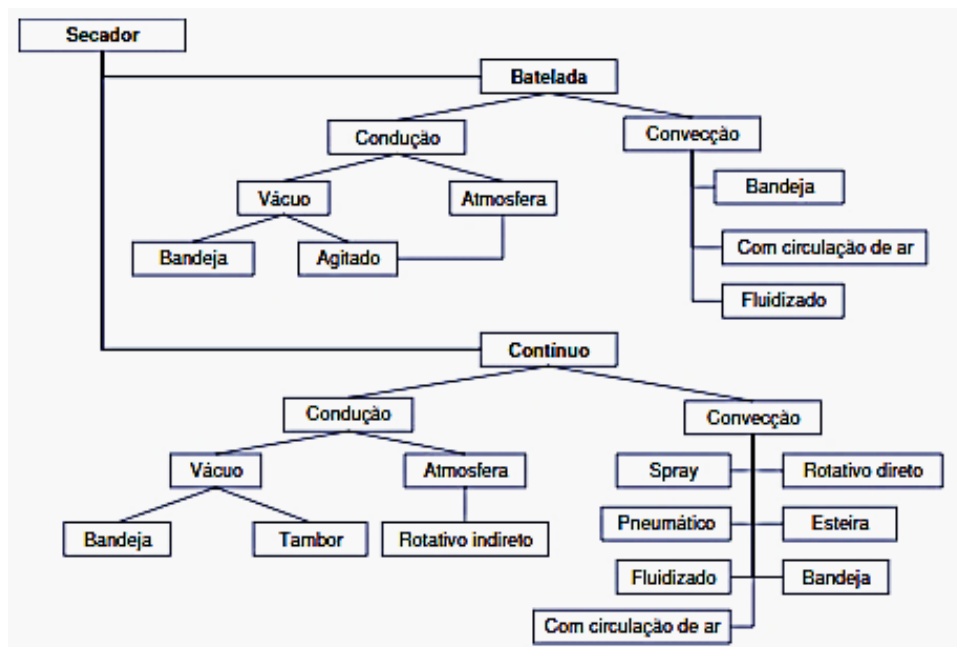
Nos alimentos, a secagem surge como uma alternativa para reduzir perdas indesejadas devido ao tempo de maturação natural. A princípio, eram aplicados apenas métodos de secagem natural, sendo realizados em regiões com exposição a alta radiação

solar e baixa umidade relativa do ar, para que a ação das energias solar e eólica proporcionassem a desidratação do material.

Com os avanços da tecnologia, surgiram as secagens artificiais, onde todas as condições são controladas para que a umidade seja retirada da forma desejada. Na secagem artificial há uma retenção maior de vitaminas quando comparada a secagem solar (GAVA, 2000). Apesar do gasto energético, os métodos artificiais proporcionam padrão de qualidade da produção, diferente da secagem natural que dependente de fatores externos não programados (GURGEL, 2014).

Há diversos equipamentos e técnicas de secagem artificial, como por exemplo, secador de bandejas, secador de túnel, secador de esteira, secador de tambor rotativo, secador de leito fluidizado, liofilizador, secador por atomização e outros. Cada equipamento de secagem possui suas especificações, características e modo de operação diferentes. Em termos de modo de operação, os secadores podem ser divididos de acordo com a Figura 2. A escolha do secador irá depender do material a ser seco e das condições desejadas para a secagem.

Figura 2: Tipos de secadores quanto ao modo de operação.

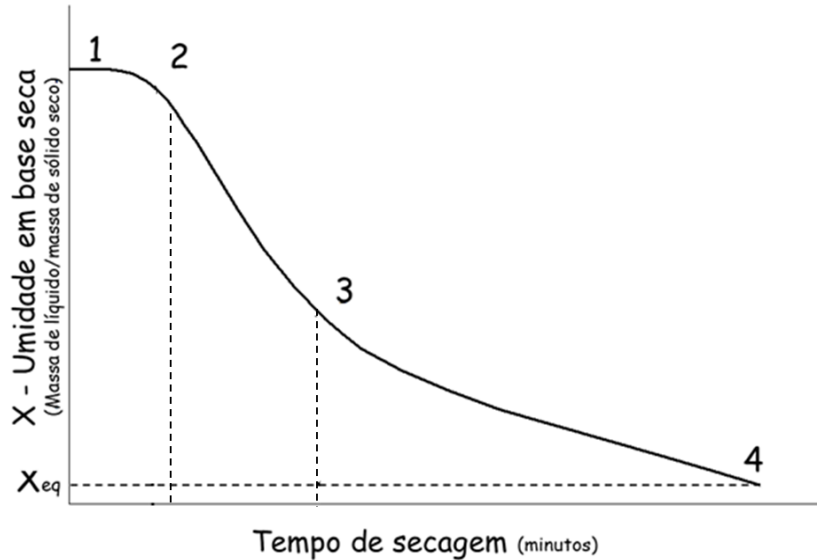


Fonte: Park *et al.* (2006).

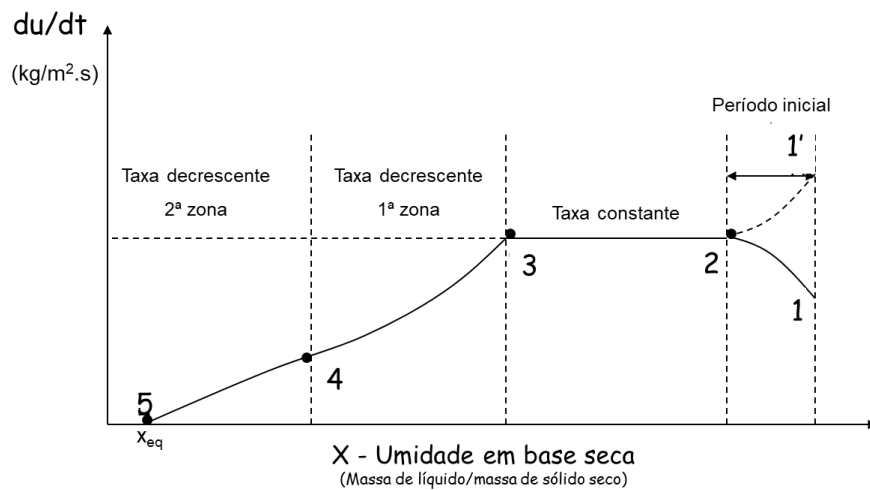
A secagem pode ser avaliada por meio de gráficos que relacionam a perda de umidade no decorrer do tempo, conhecidos como curvas de secagem, como por exemplo na Figura 3 (a) e (b). O estudo da cinética da secagem permite avaliar as variações de

massa do produto ao longo do processo, como também ver os períodos de variação de taxa.

Figura 3: Curvas de secagem.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2022); adaptado de FOUST *et al.* (1982).

Na Figura 3 (a) tem-se a perda de umidade com o tempo de secagem e na Figura 3 (b) tem-se a relação da taxa de secagem (derivada da umidade pelo tempo) pela umidade. Na Figura 3 (a) é possível visualizar um período inicial, 1-2, onde há aumento da temperatura do material ao entrar em contato com o ar de secagem, seguido por um período constante, 2-3, onde a difusão de água no interior do sólido é equivalente à fração

de água que se vaporiza na superfície (MARTINS *et al.*, 2020; FOUST *et al.*, 1982). Em seguida, há um período decrescente, 3-4, e a continuação da secagem até atingir a umidade de equilíbrio (X_{eq}) e o sólido não sofrer mais variações de umidade. No ponto X_{eq} a pressão de vapor no sólido é a mesma pressão parcial do vapor no ar. Na Figura 3 (b) é possível visualizar dois períodos de taxa decrescente, 3-4 e 4-5 até atingir a umidade de equilíbrio.

De acordo com Park *et al.* (2006), o período de taxa constante é baseado nas transferências que ocorrem na superfície do material, e o de taxa decrescente é baseado nas transferências internas da secagem. No período de taxa constante o movimento da umidade dentro do sólido ocorre de forma rápida, mantendo a condição de saturação na superfície, e a velocidade de transferência de calor para a superfície evaporante controla a velocidade da secagem, assim, a velocidade de transferência de massa equilibra a de calor e a temperatura da superfície saturada permanece constante.

Já o período de taxa decrescente pode se dividir em dois, onde no primeiro há a difusão de vapor a partir da superfície saturada para o gás de secagem e a difusão direta do vapor nos níveis mais internos do sólido para a superfície insaturada, e posteriormente para a corrente gasosa. No segundo período de taxa decrescente a influência das variáveis externas é reduzida e a velocidade do movimento de umidade interna passa a controlar a velocidade de secagem.

A determinação das curvas de secagem pode ser tanto por pesagem direta da amostra como pelo monitoramento da umidade do ar de secagem em questão (DANTAS, 2010). Quando realizada por pesagem direta, determinam-se intervalos de pesagem para análise do decaimento de massa com o tempo, já quando realizada pelo monitoramento do ar, são necessários instrumentos específicos para medição na entrada e saída do secador.

A análise das curvas de secagem permite verificar o comportamento do material durante todo o processo, sendo fundamental na otimização e predição de dados relevantes para determinação das melhores condições experimentais. É de grande relevância ajustar os parâmetros adequados para a secagem, pois ao ser feita de forma inadequada a secagem pode resultar em produtos com modificações indesejáveis de cor e sabor e perdas de nutrientes, minerais ou outros componentes voláteis. As perdas podem ser intensificadas se não houver um planejamento adequado das condições de processo.

3.2.1 Secagem por camada de espuma

A secagem por camada de espuma, conhecida por *foam-mat*, é um método de secagem que consiste na transformação de um determinado material em espuma, por meio da incorporação de ar, para que o mesmo seja submetido a desidratação para retirada da umidade (PAIVA, 2020).

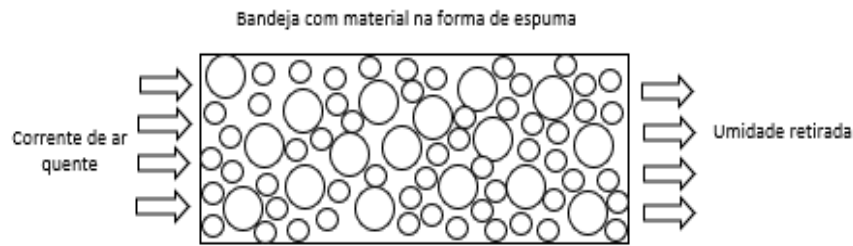
Para batimento do material líquido, se utiliza bateadeiras de alta rotação, para que o ar incorporado provoque a expansão do volume. Dependendo do material pode ser necessário o uso de agentes espumantes para promover essa expansão. Com isso, a área de contato é aumentada, facilitando a transferência de calor e massa (FRANCO, 2015).

A espuma é depositada em placas de metal para ser submetida a secagem, sendo elas geralmente de alumínio, material que também facilita as trocas térmicas. A espessura da placa influencia diretamente no tempo de secagem e na umidade final do material seco. Quanto mais fina a espessura da placa, maior a área de contato e conseqüentemente há um menor tempo de secagem de uma mesma quantidade de material.

No entanto, segundo Araújo (2019), a maior área de contato decorrente da menor espessura pode ser uma desvantagem, uma vez que é necessária uma grande área de secagem para obtenção de uma quantidade maior do produto em pó. Após ser acomodado nas placas, o material é submetido a secagem em estufas ou secadores com circulação de ar.

O ar quente de secagem, ao entrar em contato com o material poroso distribuído de maneira uniforme, promove a desidratação a partir da retirada de umidade, por meio de processos de transferência de calor e massa. O processo pode ser ilustrado da Figura 4. Essa secagem gera um produto final poroso e quebradiço que pode ser transformado em pó (SOUZA, 2011).

Figura 4: Secagem por camada de espuma.



Fonte: Autora (2020).

Devido a possibilidade do uso de temperaturas baixas e menor tempo de exposição do material ao calor, esse método é usualmente aplicado em materiais termicamente sensíveis. Outra vantagem desse método, é o baixo custo de operação e manutenção quando comparado a técnicas mais complexas como o spray-drying e drum-drying, por exemplo. Devido ao menor tempo de exposição ao calor o sabor e o valor nutricional são parâmetros preservados no produto final (PINTO, 2009).

A secagem pelo método camada de espuma permite o processamento de biomateriais difíceis de secar, como a polpa de tomate, e também permite a produção de materiais que podem ser reidratados facilmente e reter diversos indicadores de qualidade, como por exemplo: cor, aroma, textura e valores nutricionais (FERNANDES *et al.*, 2014).

3.2.2 Influência dos ingredientes espumantes no método camada de espuma

No método *foam-mat* a necessidade de formação de espuma faz com que, a depender do material, seja necessário o uso de emulsificantes (ingredientes com propriedades espumantes) e estabilizantes. Os emulsificantes são responsáveis por formar ou manter uma mistura de fases imiscíveis no alimento, enquanto os estabilizantes são responsáveis apenas pela manutenção de mistura de fases imiscíveis (LOBO, 2017).

A estabilidade da espuma é um ponto fundamental no processo de secagem por *foam-mat*, sendo necessária uma boa análise da quantidade ideal de ingredientes com propriedades espumantes e estabilizantes usados para cada material, garantindo que não haja colapso da espuma. Apesar de uma quantidade maior de ingrediente espumante diminuir a densidade final, é necessário ter cautela, pois quando excessiva, também pode provocar colapso na espuma. Sem mencionar que pode provocar modificações sensoriais no alimento (RATTI, 2006).

Dentre os ingredientes espumantes utilizados na literatura tem-se a o Emustab®, CMC, goma xantana, albumina, maltodextrina, superliga natura®, gelatina e outros, cada um com as suas particularidades, interagindo de forma distinta com o material a ser submetido a secagem.

Dantas (2010), na secagem de polpas de manga e abacaxi, testou diferentes formulações com uso de goma agar agar, liga neutra artesanal (a base de sacarose e dos espessantes carboximetilcelulose – CMC e goma guar) e emulsificante (a base de sacarose, monoglicérido destilado, éster de glicerol, estereato de potássio em glicerol e propileno glicol), sendo esses dois últimos fornecidos pelo fabricante Marvi LTDA, Brasil. Os ensaios de secagem com resultados mais apropriados para as polpas de manga e abacaxi foram obtidos com formulação de 1% p/p de liga neutra artesanal e 1% p/p de emulsificante.

Kadam *et al.* (2011) ao utilizaram carboximetilcelulose, leite, e clara de ovo em diferentes proporções na formação de espuma de polpa de tangerina para a secagem *foam-mat* em temperaturas de 65 a 85°C, e concluíram que o agente espumante CMC foi mais adequado, na faixa de concentração de 0,5-1,0% a 75 °C. Os autores afirmam que os pós de tangerina podem ser armazenados por um longo tempo sem sofrer muitas perdas nutricionais e de qualidade.

Fernandes *et al.* (2013) na secagem de polpa de tomate pelo método *foam-mat* utilizou albumina como adjuvante em diferentes concentrações para avaliar sua influência no tempo de batimento e estabilidade, sendo a condição ótima encontrada 4,5% de albumina e 4,5 minutos de batimento. Nessa condição foi obtida uma espuma menos densa e mais estável. Em relação a temperatura, os autores não observaram diferenças significativas nas propriedades de textura das espumas em temperaturas de 60 e 80°C.

Delmiro (2016), na secagem de cenoura pelo método de camada de espuma utilizando Emustab®, obteve bons resultados de expansão da espuma com 2,5% de aditivo. Pegado (2016), também fez uso de Emustab® para obter farinha de batata-doce, com concentrações de 1 a 3% de aditivo, obtendo resultados de expansões e estabilidade consideráveis em todas as porcentagens, mas com melhores resultados para 3% de aditivo.

Guimarães *et al.* (2017) na secagem em camada de espuma da polpa de manga cv. Keitt com adição de 1% de Emustab® e 1% de Super Liga Neutra®, utilizaram temperatura de secagem de 50, 60 e 70 °C e espessuras de camada de espuma de 0,5, 1,0 e 1,5 cm, obtendo melhores resultados na menor espessura e na temperatura mais alta.

Talamani (2018) ao estudar a formação de espumas estruturadas a partir de misturas de apenas 1% de caseína com 0,4% de polissacarídeos (alginato de sódio, goma xantana e carboximetilcelulose) obteve espumas com grande overrun, ou seja, uma grande expansão, e maior tempo de meia vida, além de apresentar aumento na viscosidade.

Coelho *et al.* (2019) no estudo da estabilidade da espuma da polpa de acerola para secagem pelo método foam-mat drying usando como aditivos Super Liga Neutra® e Emustab® e obtiveram resultados satisfatórios, apresentando valores menores que 0,5 g/cm³ para densidade nas formulações com 4 e 5% de ambos os aditivos utilizados, sendo espumas estáveis, sem apresentarem volume de líquido drenado nem colapso.

Silva *et al.* (2021) na secagem de polpa de caqui (*Diospyros kaki L.*) em camada de espuma usando como aditivo um emulsificante a base de sacarose, monoglicerídeo destilado, éster de glicerol, estereato de potássio em glicerol e propileno glicol a partir da análise de diferentes tempos de batimento na formação da espuma (20, 25 e 30 minutos) e em diferentes temperaturas de secagem (60, 70 e 80 °C). Os autores concluíram que para os tempos de batimento estudados mostraram influência significativa e redução significativa do tempo de secagem nas temperaturas mais elevadas.

Santos *et al.* (2022) na secagem de polpa de abacate, avaliaram as características da espuma e o impacto do pré-tratamento com etanol no comportamento de secagem. Obtiveram os melhores resultados na condição com 20% de leite de cabra, 8% de Emustab® e 15 min de tempo de batimento. Os autores realizaram as secagens nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, obtendo um tempo de secagem de 270 minutos na temperatura de 70°C e com o pré-tratamento com etanol, sendo esse tempo o mais rápido.

3.3 Leite e caseína

O leite bovino possui a função natural de proporcionar aminoácidos essenciais necessários para o desenvolvimento dos mamíferos, sem mencionar suas propriedades importantes nas características de muitos produtos lácteos, sendo muito utilizado na

fabricação de queijos e outros produtos, certificando o rendimento de suas produções (YE, 2011).

O leite é uma emulsão líquida composta por lipídeos, proteínas, carboidratos, vitaminas e minerais. Seu consumo é recomendado por ser fonte de cálcio, componente fundamental para a saúde óssea. Nos componentes do leite as proteínas são as de maior valor para a industrialização, pois o rendimento e eficiência do leite nas produções de coprodutos interfere diretamente na lucratividade das indústrias. Essas produções são dependentes dos parâmetros de sanidade do rebanho (contagem de células somáticas) e higiene (contagem bacteriana total), que afetam a matéria-prima (BRASIL *et al.*, 2015).

Seu conteúdo proteico é dominante, apresentando de 30 a 36 g/L de proteínas totais, sendo as principais: α 1-caseínas, α 2-caseínas, β -caseínas, κ -caseínas, β -lactoglobulinas e α -lactalbuminas. As proteínas do leite são basicamente divididas em caseínas e proteínas do soro, sendo as caseínas 80% das proteínas totais (DAMODARAN *et al.*, 2010). A Tabela 1 mostra as concentrações das proteínas do leite.

Dentre as diferentes caseínas, as α 1-caseínas são cadeias peptídicas com 199 resíduos de aminoácidos, sendo 40% da caseína do leite de boi, já as α 2-caseínas possuem 207 resíduos de aminoácidos e se precipitam facilmente na presença de íons Ca^{2+} . As β -caseínas possuem cadeias peptídicas com 209 resíduos de aminoácidos, e são as caseínas mais hidrofóbicas, com semelhança aos surfactantes em sua estrutura e com capacidade emulsificante por causa da sua habilidade de redução da tensão superficial do meio. Já as κ -caseínas apresentam cadeias peptídicas contendo 169 resíduos de aminoácidos e permanece solúvel na presença de íons Ca^{2+} (TALAMANI, 2018).

Tabela 1: Concentrações das proteínas do leite.

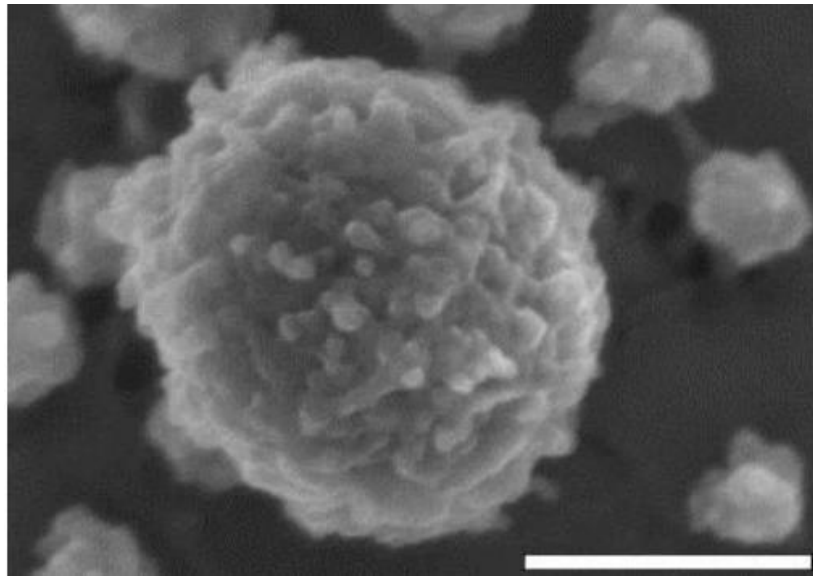
Proteína	Concentração (g/L)	Porcentagem aproximada do total de proteínas
Caseínas	24-28	80
α s-caseínas	15-19	42
α s1	12-15	34
α s2	3-4	8
β -caseínas	9-11	25
κ -caseínas	3-4	9
γ -caseínas	1-2	4
Proteínas do soro	5-7	20
β -lactoglobulinas	2-4	9
α -lactoalbumina	1-1,5	4
Proteose-peptonas	0,6-1,8	4
Proteínas do sangue	-	-
Albumina sérica	0,1-0,4	1
Imunoglobulinas	0,6-1,0	2
Total	100	100

Fonte: Damodaran *et al.* (2010).

Segundo Damodaran *et al.* (2010), a maior parte dos componentes do leite existem como estruturas associadas, como é o caso das caseínas, que são encontradas como complexos de micelas esféricas de 30 a 300 nm de diâmetro, apenas uma pequena parte possui micelas com cerca de 600 nm.

As micelas são partículas coloidais formadas pela fosforilação da estrutura anfifílica presente nas caseínas. Essas micelas são bastante hidratadas, mas levando em consideração apenas a massa seca, 94% são de proteína e 6% são de espécies com baixa massa molecular, como por exemplo, fosfato de cálcio coloidal. Por serem de dimensão coloidal, as micelas são capazes de espalhar luz, promovendo a coloração branca do leite, e em caso de rompimento das micelas a cor é perdida (FOX *et al.*, 2015). Na Figura 5 podemos ver a estrutura da micela de caseína.

Figura 5: Estrutura da micela de caseína obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura na escala representativa de 200 nm.



Fonte: Dalgleish *et al.* (2004).

A estabilização das micelas está relacionada com a formação da caseína. Segundo O'Connell *et al.* (2006), alguns dos fatores que afetam a estabilidade das micelas são a hidrólise enzimática da k-caseína, temperatura, pH, excesso de Ca^{2+} e adição de etanol.

De acordo com Fox *et al.* (2015), as micelas são bastante estáveis a temperaturas altas, chegando a coagular somente com aquecimento a 140 °C por 15 a 20 minutos no pH normal, devido as mudanças severas que a alta temperatura proporciona no leite quando exposto ao calor. As mesmas também são estáveis a compactação, podendo ser sedimentadas por ultracentrifugação. Ainda, são estáveis à homogeneização comercial, sendo ligeiramente alteradas somente em pressões muito altas (500 Mpa).

Em relação a adição de etanol ao leite, sabe-se que ela provoca modificações nas micelas de caseína, causando colapso da camada de κ -caseína. Isso faz com que a carga micelar e a precipitação do fosfato de cálcio sejam reduzidas, causando instabilidade nas micelas (O'CONNELL *et al.*, 2006).

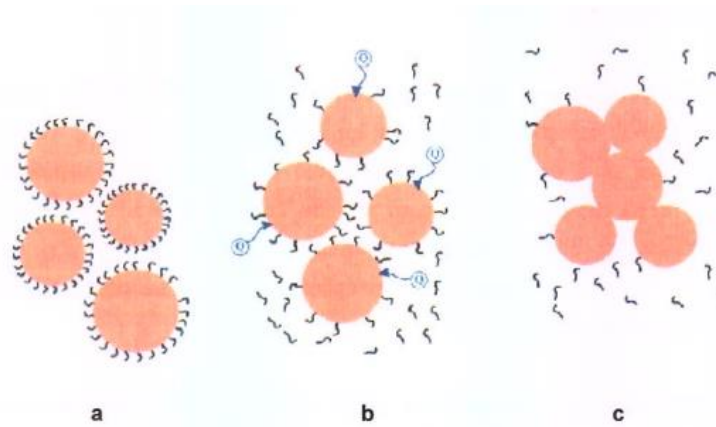
Resultante da separação das proteínas do leite têm-se também o soro do leite, sendo seus componentes principais a α -lactalbumina e β -lactoglobulina. No soro, a maioria das proteínas possuem alta hidrofobicidade e cadeias peptídicas densamente dobradas (PHADUNGATH, 2005). Por muito tempo descartou-se o soro durante a extração da caseína, até perceber que é um elemento rico em proteínas importantes.

3.4 Extração da caseína

A caseína é extraída por meio da separação das proteínas do leite. Um dos meios mais comuns de separação das proteínas é em meio ácido, com pH 4,6, nesse processo de acidificação o soro obtido é ácido. Outro meio comum é coagulação utilizando enzimas, mas nesse caso o soro obtido contém sabor adocicado.

A coagulação da caseína feita com o tratamento com enzimas é com o leite desnatado, e essa coagulação enzimática é dividida em dois estágios: no primeiro há o ataque das enzimas proteolíticas às moléculas de κ -caseínas, desestabilizando a estrutura das micelas; e o segundo é a coagulação das micelas quando há a desestabilização (ROMAN *et al.*, 2005). Na Figura 2 podemos ver a descrição do processo.

Figura 6: Representação da coagulação do leite. a) micelas com revestimento intacto; b) remoção parcial da κ -caseína; c) remoção final da κ -caseína e início da agregação micelar.



Fonte: ROMAN *et al.* (2005).

A coagulação em meio ácido acontece no ponto isoelétrico, e se dá devido a carga líquida nesse valor extremo de pH, que causa forte repulsão eletrostática intramolecular. O pH tem influência direta na estabilidade do leite, que é reduzida quando se obtém valores abaixo de 6,2. Isso ocorre pois na acidificação há o aumento na quantidade de cálcio iônico, aumentando a chance de ocorrência da precipitação. (O'CONNELL *et al.*, 2006).

A correção do pH na acidificação geralmente é feita com o ácido clorídrico (HCl), tanto em escola laboratorial como industrial, até a faixa de 4,6. No laboratório, melhores resultados são obtidos pela acidificação do leite desnatado a pH 4,6 a 2 °C, mantendo por cerca de 30 min e depois aquecendo a 30–35 °C (FOX *et al.*, 2015).

3.5 Capacidade espumante e estabilidade

A capacidade de formação de espuma da caseína se dá devido a adsorção interfacial e a formação de um filme estável entre as fases, que são mecanismos que auxiliam as bolhas de ar serem formadas. Assim, é de grande relevância analisar os aspectos que influenciam essa capacidade espumante, uma vez que as espumas podem ser aplicadas na indústria de alimentos na modificação de produtos existentes (DAMODARAN *et al.*, 2010).

Espumas e emulsões são sistemas coloidais formados por duas fases, uma dispersa e uma contínua. A capacidade da proteína de formar uma espuma está relacionada a expansão de volume à medida que se incorpora ar no componente, seja por batimento ou agitação, que forma uma interface ar/água. Essa capacidade é uma propriedade funcional que é dependente de fatores com: natureza da proteína, concentração e solubilidade proteica, estado de desnaturação proteica, pH e outros (SGARBIERI, 1996).

A estabilidade da espuma tem relação direta com as propriedades mecânicas do filme e com as forças intermoleculares que atuam na tensão superficial. Por vezes, o aumento da tensão superficial durante a formação da espuma a torna instável, e para estabilizar a espuma, pode-se fazer uso de surfactantes. Esses surfactantes atuam reduzindo a tensão superficial à medida que se organizam na superfície do filme da espuma (TALAMANI, 2018).

De acordo com Damodaran *et al.* (2010), outro ponto que afeta diretamente na estabilidade da espuma é o pH, uma vez que espumas estabilizadas por proteínas apresentam maior estabilidade no ponto isoelétrico, uma vez que a falta de interações repulsivas favorece as reações proteína-proteína. Em um pH diferente do isoelétrico, apesar da espumabilidade poder ser boa, geralmente a estabilidade é baixa.

A concentração de sais também é fator de influência na estabilidade de espuma, mas apresenta comportamento diferente a depender da proteína. Em proteínas como albumina, a estabilidade e espumabilidade aumentam com a elevação da concentração de NaCl, devido a neutralização das cargas pelos íons salinos. Já na proteína do soro do leite, esses parâmetros decrescem com o aumento da concentração de sais (ZHU *et al.*, 1994).

As proteínas também são bastante utilizadas na estabilização de espumas, pois diferente dos surfactantes de baixo peso molecular, elas são capazes de criar uma película

viscoelástica que suporta choques mecânicos durante os processos. Assim, as proteínas são muito usadas nessa finalidade. Apesar de todas as proteínas serem anfifílicas, suas propriedades são diferentes das dos surfactantes (DAMODARAN *et al.*, 2010).

Segundo Dickinson (2006), a caseína presente no leite é agregada com fosfato de cálcio formando micelas, que após a remoção do fosfato de cálcio, formam o caseinato de sódio, que ajuda a proporcionar estabilidade no sistema, e por isso, é muito usado na produção de alimentos, devido a sua rápida adsorção em interfaces óleo-água durante emulsificações.

A espumabilidade de uma proteína está relacionada com a quantidade de área interfacial que a mesma pode criar. De acordo com Damodaran *et al.* (2010), uma das formas de caracterizar isso é pelo overrun ou pelo poder espumante (FP), que podem ser calculados pelas Equações a seguir:

$$\text{Overrun} = \frac{\text{Volume da espuma}}{\text{Volume de líquido inicial}} * 100$$

$$\text{FP} = \frac{\text{Volume de gás incorporado}}{\text{Volume de líquido}} * 100$$

Os autores afirmam que o poder espumante pode ser modificado com o método usado para formação de espuma, e que o mesmo aumenta com a concentração proteica até atingir um valor máximo.

3.6 Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos são aplicados com a finalidade de se verificar a validade e concordância dos dados experimentais com os preditos pelos mesmos, ou seja, o quanto os dados experimentais se aproximam ou se distanciam dos preditos. Assim, através dos modelos é possível simular dados cinéticos com o objetivo de avaliar o desempenho da secagem.

Os modelos aplicados podem ser teóricos, semi-teóricos ou semi-empíricos e empíricos. Os modelos teóricos são fundamentados na segunda Lei de Fick, que se baseia na difusão interna como mecanismo que controla a transferência de massa durante o período de taxa de secagem decrescente. Esses modelos levam em conta a resistência interna a transferência de massa. Os modelos semi-teóricos baseiam-se na Lei de Newton

para o resfriamento, levando em consideração a transferência de massa. Já os modelos empíricos levam em consideração fatores externos a secagem (REIS, 2019).

Há uma série de modelos na literatura que podem ser aplicados para análise das cinéticas de secagem, através da relação entre razão de umidade com o tempo de secagem dos materiais, como por exemplo, o modelo de Lewis (1921), que considera que a taxa de secagem é proporcional a quantidade de água disponível para secar. O modelo de Page, de acordo com Diamante e Munro (1993), é uma remodelagem do modelo de Lewis com adição do expoente “n” na variável tempo.

O processo de secagem de um sólido e sua redução de umidade podem ser descritos aplicando-se modelos matemáticos que consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda lei de Fick. No caso do foam-mat, realizado em placas planas, a segunda lei de Fick é aplicada considerando difusão unidimensional da água na matriz com geometria definida por uma placa plana homogênea e infinita, representada pela Equação 1 (CRANCK, 1975).

$$\frac{d\bar{X}_{bs}}{dt} = Def * \frac{d^2\bar{X}_{bs}}{dz^2} \quad (1)$$

Onde Def é o coeficiente de difusividade efetiva (m²/s), \bar{X}_{bs} é a umidade em base seca (g de água/g sólido seco) e z (m) é o eixo correspondente do transporte de massa.

A teoria difusional da Lei de Fick é usada como base para muitos modelos, e apresenta o coeficiente de difusividade efetiva, que por não ser uma propriedade intrínseca do material, leva em consideração os fenômenos que podem provocar modificações na taxa de transferência de massa (DANTAS, 2010).

Assim, levando em consideração a secagem de uma placa plana (meio poroso) com coeficiente de difusão efetivo constante, condição inicial de umidade uniforme em toda a placa, e condições de contorno, umidade finita no centro da placa e umidade de equilíbrio na superfície, a Equação 1 pode ser simplificada na Equação 2 (CRANCK, 1975).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} * \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} * \exp \left[-(2n+1)^2 * \frac{\pi^2 * Def * t}{L^2} \right] \quad (2)$$

Onde RU é a razão de umidade adimensional, Def é o coeficiente de difusividade efetiva em m^2/s , t é o tempo em segundos, L é a espessura da placa plana em metros e n é o número de termos do somatório.

A razão de umidade adimensional, RU , pode ser representada pela Equação 3, relacionando assim a umidade em base seca, a umidade inicial em base seca e a umidade de equilíbrio.

$$RU = \frac{\bar{X}_{bs} - X_{eq}}{X_{bst} - X_{eq}} \quad (3)$$

Os modelos que se baseiam na Lei de Newton do resfriamento na avaliação da secagem são aplicados a transferência de massa em que a resistência ao transporte de umidade se aplique apenas na superfície do produto (DANTAS, 2010).

Assim, o modelo de Lewis (1921) é representado por uma equação análoga à lei de Newton de resfriamento, que leva em consideração que a quantidade de água livre no material é proporcional a taxa de secagem. A resistência para o transporte de água nesse modelo é representada pela Equação 4, que na sua forma integrada é representada pela Equação 5 (ZANOELO *et al.*, 2007).

$$\frac{d\bar{X}_{bs}}{dt} = -k * (\bar{X}_{bs} - X_{eq}) \quad (4)$$

$$RU = \exp(-k * t) \quad (5)$$

Onde \bar{X}_{bs} é a umidade em base seca (g de água/g sólido seco), X_{eq} é a umidade de equilíbrio, RU é a razão de umidade, t é o tempo (s) e k é a constante cinética de velocidade (s^{-1}).

Há ainda diversos modelos semiempíricos que se baseiam na Equação 5, mas com adição de parâmetros específicos para representar diferentes comportamentos nos períodos de secagem. Alguns exemplos de modelos usados na literatura encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Modelos matemáticos.

Modelos	Equação	Referências
Lewis (1921)	$RU = \exp(-k_L * t)$	Lewis, 1921.
Page (1949)	$RU = \exp(-k_P * t^n)$	Page, 1949.
Fick (placa plana; truncado no 1º termo)	$RU = (8/\pi^2) * \exp(-\pi^2 * Def * (t/(4 * L^2)))$	Adaptado de Crank, 1975; Elpídio, 2021.
Logarítmico	$RU = a * \exp(-k_{LOG} * t) + c$	Yaldiz e Ertekin, 2001.
Midilli	$RU = a * \exp(-k_M * t) + b * t$	Midilli <i>et al.</i> , 2002

Fonte: Autora (2022).

Nas equações da Tabela 2, RU representa a razão de umidade calculada pela Equação 3, t representa o tempo de secagem em minutos, k_L , k_P , k_M , k_{LOG} , a, c e n representam os parâmetros dos respectivos modelos, Def representa a difusividade efetiva e L representa a espessura da placa.

3.6.1 Otimização dos modelos

Ao aplicar diferentes modelos matemáticos e obter bons ajustes aos dados experimentais em mais de um modelo, é necessário fazer uso de ferramentas de otimização afim de verificar qual modelo melhor se ajusta. A maneira mais habitual de definição do melhor modelo é pela verificação do coeficiente de regressão R^2 , onde valores mais próximos de 1 fornecem melhores modelos.

Os valores de RQRM (raiz do quadrado médio residual) também são bastante utilizados, uma vez que caracterizam a capacidade de ajuste do modelo aos dados experimentais, mensurando os desvios entre os valores preditos e observados. Melhores modelos apresentam menores valores para RQRM (FRANCO, 2015).

No entanto, de acordo com Floriano *et al.* (2006), a depender do comportamento dos dados, nem sempre é possível escolher o modelo que se ajusta melhor aos dados amostrais pela soma de quadrados do erro, sendo então preciso aplicar ferramentas estatísticas que realizem aproximação.

Segundo Myung *et al.* (2003), para se classificar um modelo deve-se levar em considerações alguns critérios, sendo estes critérios qualitativos e critérios quantitativos. Os qualitativos são: ter adequação explicativa, ou seja, se suas hipóteses são possíveis e adequadas aos resultados; ser interpretável, tendo sentido e sendo entendível; e ter fidelidade. Já os quantitativos são falseabilidade, qualidade de ajuste, simplicidade/complexidade e generabilidade).

Floriano *et al.* (2006) menciona ainda que dentre as ferramentas utilizadas para análise dos modelos, tem-se o critério AIC, que considera a generabilidade, como principal critério para a seleção de modelos, levando em conta tanto os dados da amostra como de toda a população ao longo do período de tempo considerado.

O autor afirma que a teoria complexa utilizada na ferramenta permite sua aplicação em modelos lineares, não-lineares, aninhados e não-aninhados. O fundamento do teste se dá pela possibilidade de compreensão do quanto o modelo é mais adequado.

Floriano *et al.* (2006); Motulsky & Christopoulos (2003) mencionam que ferramentas estatísticas como o AIC devem ser utilizadas para comparação dos modelos que se ajustaram bem aos dados, assim, não devendo ser colocados modelos que não apresentaram bons ajustes. Os dois ou três melhores devem ser usados na realização da comparação final.

3.6.2 Função de desejabilidade

A função de desejabilidade pode ser utilizada para realizar a análise de diferentes respostas através da transformação das respostas individuais em escala adimensional de desejabilidades individuais, chamadas “ d_i ”. Assim, a transformação faz com que seja realizável a junção de diferentes resultados com grandezas matemáticas distintas. Com as desejabilidades individuais, calcula-se a média geométrica delas e obtém-se a desejabilidade global, chamada “ D ”, pela Equação 6, em que m é o número de respostas analisadas (NOVAES *et al.*, 2017).

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \quad (6)$$

A avaliação da desejabilidade global pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3: Avaliação da desejabilidade por Harrington.

Desejabilidade	Descrição
1,00	Máximo em satisfação e qualidade (uma melhoria para além deste ponto não teria valor considerável)
1,00–0,80	Aceitável e excelente (qualidade incomum ou desempenho bem além do que está disponível no mercado)
0,80–0,63	Aceitável e bom (avanço em relação à melhor qualidade comercial)
0,63–0,40	Aceitável, mas pobre (qualidade é aceitável para os limites de especificação, mas a melhoria é desejável)
0,40–0,30	Limítrofe para as especificações mínimas ou máximas
0,30–0,00	Inaceitável (possível ocorrência de falhas)
0,00	Completamente inaceitável

Fonte: Paula & Fernandes (2018); Ribardo & Allen (2003).

Capítulo 4

Metodologia

4. METODOLOGIA

A coagulação da caseína, preparação das espumas e secagem pelo método da camada de espuma foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Alimentos. As análises realizadas com a balança de umidade foram feitas no Laboratório de Alimentos.

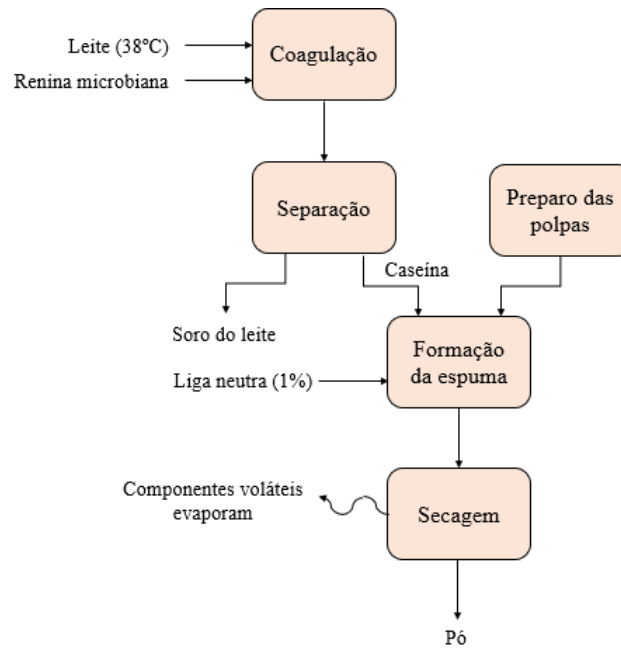
A polpa de tomate cru foi feita processando o tomate da marca Santa Adélia vermelho maduro, adquirido no supermercado local, no liquidificador até a homogeneização completa, com as sementes e sem adição de outros ingredientes. A polpa de tomate cozido foi feita processando o tomate cozido (por 10 e 20 minutos) no liquidificador até homogeneizar.

4.1 Fluxograma geral da metodologia

O Fluxograma ilustra o processo de obtenção dos pós, onde na primeira etapa há a mistura por 1 minuto da renina microbiana ao leite a 38 °C e o descanso com o corte adequado para formação do coágulo de caseína. A etapa seguinte é a separação da caseína do soro, que é feita com uma pipeta volumétrica, coletando 70 g de soro e obtendo a caseína a ser utilizada em etapa posterior.

O preparo das polpas é realizado e a polpa com a caseína vão para a etapa seguinte, de formação da espuma, onde é adicionada a liga neutra (1%) para manter a estabilização da espuma. A espuma é submetida a secagem em estufa com temperatura controlada e o pó final pode ser obtido após a evaporação da água e demais componentes voláteis.

Fluxograma 1: Processo de obtenção do pó.



Fonte: Autora (2022).

4.2 A coagulação do leite

O leite utilizado para extração da caseína foi o Italc desnatado, mostrado na Figura 7, comercializado nos mercados da cidade de Natal. Inicialmente realizou-se a pesagem em um béquer de 250 g do mesmo. Em seguida, realizou-se o aquecimento até 38 °C em micro-ondas em intervalos de 15 segundos, medindo a temperatura com um termômetro comum de laboratório até atingir a temperatura desejada.

Figura 7: Leite desnatado.



Fonte: Autora (2022).

Posteriormente, adiciona-se a quantidade de coagulante comercial determinada pelo teste de coagulação. O teste de coagulação foi realizado para definir a quantidade de

coagulante adequada para a coagulação ser viável, onde foram feitos testes com diferentes quantidades de coagulante (0,015, 0,1 e 0,3 g) e tempo de coagulação (3, 4, 6 e 8 horas).

O coagulante deve ser colocado na amostra de leite aquecida a 38°C, e é realizada a agitação manualmente por 1 minuto. O coagulante comercial utilizado foi da marca HA-LAMAX, contendo a renina microbiana, mostrado na Figura 8. Feito isso, o béquer é fechado com papel filme e colocado no banho termostático TE-054 mag marca TECNAL na temperatura controlada de 40°C para descanso e formação da caseína.

Figura 8: Renina Microbiana.



Fonte: Autora (2022).

Em seguida, vem a etapa de corte, onde foram feitos testes com 1 e 2 horas de descanso para realização dos cortes em formato xadrez. Após os cortes, fechou-se novamente o béquer com papel filme e colocou-se novamente no banho termostático descansando até completar o tempo de coagulação (3, 4, 6 e 8 horas). Por fim, tem-se a formação da caseína e do soro do leite.

A metodologia escolhida após os testes iniciais foi para o tempo de coagulação 4 horas totais, com o corte feito com 1 hora e quantidade de coagulante 0,3 gramas, pois já foi o suficiente para formação de uma caseína estável. A separação da caseína e do soro foi feita retirando uma quantidade padrão de 70 g de soro com uma pipeta, tendo-se bastante cautela para não desestabilizar os coágulos de caseína formados.

4.3 Preparação da espuma

Vários testes foram realizados para definir a metodologia a ser adotada na preparação das espumas. com diferentes tempos de batimento da caseína e diferentes forma de incorporação da polpa a espuma. Testou-se inicialmente uma metodologia na qual primeiro a caseína e a liga neutra foram submetidas a agitação máxima por 3

minutos, em seguida foi adicionada a quantidade determinada de polpa a espuma já formada e submetida a um novo batimento por mais 2, 4 e 6 minutos, com a finalidade de avaliar como esse aumento do batimento influenciava na expansão da espuma.

Depois de vários testes definiu-se para preparação da espuma a adicionar quantidades de 150 g de caseína com 50, 60 e 70% de polpa, com 1% de liga neutra sob o total. Primeiro, a caseína e a liga neutra foram submetidas a agitação máxima em uma bateadeira planetária modelo PHP 500 da Philco por 5 minutos. Em seguida foi adicionada a quantidade determinada de polpa a espuma já formada, sendo a mistura submetida a um novo batimento por mais 2 minutos. Esta metodologia é descrita por Santos (2022) na secagem de polpa de umbu, siriguela e jaboticaba.

4.3.1 Adição de estabilizante

Com o intuito de melhorar a estabilidade da espuma ingredientes com propriedades estabilizantes podem ser adicionados. Nessa pesquisa, como a própria caseína do leite é responsável por agir como um agente espumante, foi adicionado apenas 1% de Liga Neutra da marca Du Porto, composto estabilizante industrial contendo açúcar, espessantes goma guar e carboximetilcelulose de sódio, com a finalidade de aumentar a estabilidade da espuma formada.

4.4 Secagem das espumas

Após a formação das espumas, as mesmas foram depositadas de maneira uniforme em placas de alumínio previamente pesadas, com dimensões de 0,8 cm de espessura, 36,9 cm de comprimento e 21,8 cm de largura. As placas foram colocadas em uma estufa de circulação de ar forçada com a temperatura ajustada em 60, 70 e 80 °C. Em intervalos de tempo de 10 min as placas eram retiradas e pesadas, acompanhando-se a perda de massa por evaporação da água e obtendo-se assim os dados relativos à cinética de secagem do material. Para a obtenção das curvas de secagem o acompanhamento da perda de massa se dará até peso constante, ou seja, até que as condições de equilíbrio termodinâmico sejam alcançadas.

4.5 Planejamento experimental

O planejamento experimental utilizado no presente trabalho foi com base em um delineamento experimental fatorial do tipo 2³, que se encontra na Tabela 4, que mostra os

valores codificados e reais de cada variável independente, com três réplicas aplicadas ao ponto central. Com essa estrutura, foi possível escolher a melhor condição experimental dentre as três variáveis de efeito principais e suas interações nos níveis -1, 0 e +1.

As variáveis de efeito principais e independentes foram a temperatura de secagem (60, 70 e 80 °C), tempo de cozimento (0, 10 e 20 minutos) e concentração de polpa de tomate presente na secagem (50, 60 e 70%). As variáveis dependentes selecionadas foram higroscopicidade (%) e tempo de secagem para atingir 4% de umidade (minutos).

Os experimentos foram executados em ordem aleatória, e a avaliação estatística dos resultados foi feita através do software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulusa, Oklahoma, Estados Unidos). O intervalo de confiança r utilizado foi de 95%. A melhor condição foi definida por meio da otimização pelo mesmo software.

Tabela 4: Planejamento experimental 2³ com descrição das variáveis independentes.

Experimento	Temperatura de secagem (°C)	Tempo de cozimento (minutos)	Concentração de polpa (%)
1	60 (-1)	0 (-1)	50 (-1)
2	60 (-1)	0 (-1)	70 (+1)
3	80 (+1)	0 (-1)	50 (-1)
4	80 (+1)	0 (-1)	70 (+1)
5	70 (0)	10 (0)	60 (0)
6	70 (0)	10 (0)	60 (0)
7	70 (0)	10 (0)	60 (0)
8	60 (-1)	20 (+1)	50 (-1)
9	60 (-1)	20 (+1)	70 (+1)
10	80 (+1)	20 (+1)	50 (-1)
11	80 (+1)	20 (+1)	70 (+1)

Fonte: Autora (2022).

4.6 Caracterização da polpa, caseína e espuma

4.6.1 Densidade da polpa, caseína e espuma

A densidade foi determinada utilizando-se provetas de 10 mL para a polpa e caseína e de 30mL para as espumas. As amostras foram colocadas em provetas, previamente taradas, preenchendo-se completamente o volume das mesmas. As provetas foram pesadas em balança de precisão do modelo AD330 do fabricante MARTE. As análises foram realizadas em triplicata. A densidade foi calculada através da Equação 7.

$$Densidade = \frac{m}{v} \quad (7)$$

Em que: m e v representam a massa (g) e volume (ml), respectivamente.

4.6.2 Umidade da polpa e caseína

A determinação da umidade da polpa e da caseína seguiram as normas do Instituto Adolfo Lutz (1985), sendo determinada na estufa de circulação forçada a 60 °C. Os pesa-filtros foram tarados e após resfriamento, pesados sem tampa. Quantidades de 3 a 5 g das amostras foram adicionadas aos pesa-filtro e colocados colocadas para secar em estufa com a temperatura já ajustada para 60°C por 24 h. Após as 24 h os pesa-filtros foram novamente pesados. A umidade é calculada pela diferença de massa entre as amostras antes e depois da secagem. Essas análises foram feitas em triplicata. O cálculo utilizado para a representação em termos percentuais foi efetuado conforme a Equação 8.

$$Umidade (\%) = \frac{(mpf+mi)-mf}{mi} * 100 \quad (8)$$

Em que mpf representa a massa do pesa-filtro (g), mi a massa inicial da amostra (g) e mf a massa final da amostra após as 24 h (g).

4.6.3 Sólidos totais da polpa e caseína

Os sólidos totais, representados por ST (%), mostram a quantidade de matéria que está presente no composto com exceção da umidade. Assim, após realizar a análise da umidade e obter o quanto de massa úmida foi perdida, é possível determinar o que restou de matéria, obtendo-se assim os sólidos totais da amostra conforme a Equação 9.

$$ST (\%) = 100 - umidade (\%) \quad (9)$$

4.6.4 Sólidos solúveis da polpa e caseína

Os teores de sólidos solúveis das polpas de tomate e da caseína foram determinados por diluição de 2 gramas de amostra em 10 mL de água destiladas, agitados

até homogeneização e seguidos por medição direta em refratômetro de bancada (ATAGO, Smart-1), com equipamento calibrado com água destilada. Após calibração, as amostras foram inseridas no leitor do equipamento para se efetuar a leitura. As análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram calculados pela Equação 10 e expressos em °BRIX.

$$SST (\text{°BRIX}) = \frac{(m_a + V)}{p} * l \quad (10)$$

Onde m_a é a massa da amostra, v é o volume da diluição, p é a proporção de diluição e l a leitura do equipamento.

4.6.5 Potencial hidrogeniônico

O pH foi obtido por medição no potenciômetro digital modelo Tec-5 do fabricante TECNAL, previamente calibrado com tampões de pH 4,00 e 7,00. Foi seguido o método descrito por Dantas (2010), com diluição de amostras de 10 g em 100 mL de água destilada, homogeneizadas e submetidas a leitura em temperatura ambiente. Esse procedimento foi realizado nas amostras de polpa de tomate e de caseína.

4.6.6 Expansão da espuma

A expansão da espuma representa o quanto ela aumentou seu volume ao ser submetida a incorporação de ar. Essa expansão pode ser calculada pela Equação 11.

$$\% \text{ Expansão da espuma} = \frac{\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{1}{\rho_p}} * 100 \quad (11)$$

Em que: ρ_e e ρ_p são as densidades da espuma e da polpa (g/mL), respectivamente.

4.6.7 Umidade da espuma

A umidade da espuma, em porcentagem, foi obtida por medição direta na balança de umidade M5 THERMO da marca BEL Engineering, mostrada na Figura 9, onde foram acompanhadas a pesagem de amostras de aproximadamente 1 g. O procedimento também foi feito em triplicata.

Figura 9: Balança de medição de umidade.



Fonte: Autora (2022).

4.6.8 Volume drenado da espuma

O volume drenado foi obtido pelo método descrito por Elpídio (2021), adaptado de Sauter & Montoure (1972), com o auxílio de provetas de 10 ml, funil de 50 ml e filtro de gaze, mostrado na Figura 10. Foram pesadas amostras de cerca de 3 g da espuma aguardando-se em repouso 1 hora e 30 minutos para a coleta da fração de volume drenado e estabilidade.

Figura 10: Volume drenado.



Fonte: Autora (2022).

4.6.9 Porosidade da espuma

A porosidade da espuma foi calculada pela Equação 12, descrita por Elpídio (2021), previamente determinada por Raharitsifa *et al.* (2006).

$$\phi = 1 - \frac{\rho_e}{\rho_p} \quad (12)$$

Em que ρ_e e ρ_p são as densidades da espuma e da polpa (g/mL), respectivamente. De acordo com Elpídio (2021), a equação só é válida se a densidade do ar for negligenciada em relação à densidade da polpa.

4.7 Caracterização dos pós

4.7.1 Umidade

A umidade dos pós foi medida diretamente, seguindo o mesmo procedimento descrito no tópico 4.6.7.

4.7.2 Atividade de água

A atividade de água foi medida diretamente no equipamento AQUALAB (SERIE 3TE, Brasil). As leituras foram efetuadas em amostras com 1 g dos pós. As análises foram realizadas em triplicata.

4.7.3 Higroscopicidade

A determinação da higroscopicidade seguiu a metodologia descrita por Franco (2015). foram pesadas amostras de 1 g de pó em recipientes abertos, previamente tarados, e os mesmos colocados em dessecador fechado, contendo uma solução de cloreto de sódio (NaCl) saturada 40%. O dessecador foi envolto por papel filme para garantir a vedação. Após 7 dias as amostras foram novamente pesadas. A higroscopicidade foi calculada pela Equação 13.

$$\text{Higroscopicidade (\%)} = \frac{mf - mi}{mi} \quad (13)$$

Em que a higroscopicidade (%) representa 1 g de umidade absorvida por 100 g de matéria seca; mf representa a massa após os 7 dias (g); mi a massa inicial (g).

A higroscopicidade pode ser classificada na Tabela 5.

Tabela 5: Classificação da higroscopicidade.

Classificação	Higroscopicidade
Não higroscópico	< 10%
Ligeiramente higroscópico	10,1 – 15%
Higroscópico	15,1 – 20%
Muito higroscópico	20,1 – 25%
Extremamente higroscópico	>25%

Fonte: Gea Niro Research Laboratory (2003).

4.8 Tratamento de dados

As cinéticas de secagem foram acompanhadas em um intervalo de pesagem de 10 em 10 minutos, por meio da perda de massa. Para o ajuste dos modelos cinéticos foram calculadas as razões de umidade, através da Equação 3.

A taxa de secagem foi calculada pelo diferencial de teor de umidade (dX) pelo diferencial de tempo (dt) utilizando-se o software Origin. A análise gráfica da taxa de secagem pela umidade permite identificar os períodos de taxa constante e decrescente de secagem.

4.8.1 Modelos matemáticos

Foram analisados alguns modelos matemáticos encontrados na literatura com o objetivo de verificar quais apresentam melhor ajuste e menores erros. Os modelos foram aplicados com o auxílio do software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulusa, Oklahoma, Estados Unidos) por análise de regressão não linear. Para a taxa de secagem utilizou-se o software Origin. Os modelos utilizados encontram-se na Tabela 2.

De acordo com Franco *et al.* (2015), a partir dos valores de R^2 e do RQMR (raiz do quadrado médio individual) é possível analisar o ajuste dos modelos aos dados experimentais, de forma que modelos com maiores valores para R^2 e menores valores para RQMR representam um bom ajuste experimental. O RQMR pode ser calculado pela Equação 14.

$$RQMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pred,i})^2}{N}} \quad (14)$$

Onde $RU_{exp,i}$ é a i -ésima razão de umidade experimental, $RU_{pred,i}$ é a i -ésima razão de umidade predita pelo modelo ajustado, N é o número de observações e n é o número de parâmetros no modelo.

Com a finalidade de ter uma maior relevância na escolha dos dados experimentais, uma vez que mais de um modelo pode se ajustar de maneira similar aos dados, foi aplicada a ferramenta de aproximação como o critério de informação de Akaike (AIC), de forma que o modelo com menor AIC representa o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais. Os cálculos do AIC são realizados a partir da Equação 15.

$$AIC = n * \ln\left(\frac{SQ}{n}\right) + 2 * k \quad (15)$$

Onde AIC é o critério de informação de Akaike, n é o número de observações, SQ é a soma de quadrados do erro e k é o número de parâmetros da equação.

Após a aplicação do critério, foi aplicado o cálculo de erro padrão, pela Equação 16.

$$SE = \sqrt{\frac{SQ}{(n-2)}} \quad (16)$$

Capítulo 5

Resultados e discussão

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das polpas

As polpas de tomate cru e cozidos por 10 e 20 minutos foram caracterizadas quanto a umidade, sólidos totais, sólidos solúveis, pH e densidade. Os resultados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Análises físico-químicas nas polpas.

Polpa	Umidade (%)	Sólidos Totais (%)	Sólidos solúveis (°BRIX)	pH	Densidade (g/cm ³)
Tomate cru	95,33 ± 0,34	4,67 ± 0,34	4,65 ± 0,005	4,36 ± 0,03	0,99 ± 0,001
Tomate cozido 10 minutos	93,93 ± 0,11	6,07 ± 0,11	4,75 ± 0,006	4,40 ± 0,18	0,99 ± 0,008
Tomate cozido 20 minutos	88,93 ± 0,17	11,07 ± 0,17	6,25 ± 0,009	4,52 ± 0,03	1,02 ± 0,002

Fonte: Autora (2022).

A umidade da polpa de tomate cru resultou em média 95,33%, devido ao elevado teor de água presente no mesmo. A umidade elevada influencia na conservação das frutas e, por esse motivo o tomate é tão perecível. O valor encontrado corresponde ao mencionado por Taco (2011) de 95,10% de umidade no tomate cru.

As polpas de tomate cozido com 10 e 20 minutos apresentaram valores de umidade proporcionalmente menores, em decorrência do cozimento com evaporação de parte da água. Desta forma a umidade final da polpa diminui com o aumento do tempo de cozimento, e o tomate cozido é menos suscetível a proliferação de microrganismos que na forma crua. Em consequência a concentração de sólidos totais apresentaram valores maiores nas polpas cozidas.

Em relação aos sólidos solúveis, a polpa de tomate cru apresentou valor de 4,36 °BRIX, que é similar com o valor encontrado por Trento *et al.* (2021) para a mesma cultivar utilizada no presente estudo, Santa Adélia, que obteve valor de 4,3 para tomate com maturação completada na planta. Para as polpas de tomate com 10 e 20 minutos de cozimento, esse valor aumentou para 4,75 e 6,25 devido a concentração dos sólidos solúveis.

Quanto ao pH, o valor de 4,36 foi encontrado para a polpa de tomate cru, compatível pelo mencionado em Matos *et al.* (2020), que diz que o pH do tomate deve ser menor que 4,5, podendo variar a depender das condições de armazenamento. Para os tomates com 10 e 20 minutos de cozimento, o pH foi em média 4,40 e 4,50, respectivamente.

Em relação a densidade, os valores apresentados foram similares, mas sendo mais densas para o tomate cozido com 20 minutos, devido a concentração de sólidos no cozimento. A densidade da polpa está diretamente relacionada a expansão da espuma.

5.2 Extração da caseína

Os resultados dos testes preliminares de coagulação da caseína foram realizados considerando a variação do tempo total de coagulação (3, 4, 6 e 8 horas) e da quantidade de coagulante (0,015, 0,1, 0,3 gramas). Os resultados encontram-se na Tabela 7. Foram testados cortes com 1 hora e 2 horas de coagulação, sendo mantido o corte com 1 hora de coagulação, pois já foi suficiente para uma boa liberação do soro.

Tabela 7: Testes de coagulação da caseína.

Quantidade coagulante (g)	Tempo (horas)	Resultado
0,015	3	Sem formação de caseína
0,015	4	Sem formação de caseína
0,015	6	Coágulos com instabilidade
0,015	8	Formação de queijo
0,1	3	Sem formação de caseína
0,1	4	Coágulos com instabilidade
0,1	6	Formação de caseína
0,3	3	Formação de caseína
0,3	4	Formação de caseína

Fonte: Autora (2022).

Para escolha da metodologia a ser adotada nos experimentos levou-se em consideração a quantidade mínima de coagulante a ser adicionada para se obter coágulos estáveis em um menor tempo de coagulação. Para a quantidade de coagulante de 0,015 gramas, nos tempos de 3 e 4 horas não houve formação de coágulos. No tempo de 6 horas

os coágulos formados se apresentaram visualmente instáveis, o que dificulta a separação da caseína e do soro do leite. No tempo de 8 horas, já houve a formação de queijo.

Para a quantidade de coagulante de 0,1 gramas, não houve formação de coágulos no tempo de 3 horas, observando-se formação de coágulos instáveis no tempo de 4 horas, e formação de coágulos estáveis no tempo de 6 horas. Para a quantidade de coagulante de 0,3 gramas, em 3 horas já houve a formação de coágulos estáveis de caseína, no entanto, a melhor formação deu-se com 4 horas.

Figura 11: Caseína formada.



Fonte: Autora (2022).

Assim, foi escolhida a quantidade de 0,3 gramas e o tempo de 4 horas de coagulação, com o corte na primeira hora, tempo necessário para que fosse visualizada uma boa coagulação. Na etapa de corte, os cortes foram realizados em linhas horizontais e verticais em pequenos quadrados com auxílio de uma espátula. A etapa do corte é de grande importância, pois a partir dela ocorre a liberação do soro do leite.

Na literatura, Roman (2002) obteve coagulação em leite desnatado pasteurizado em um tempo de 40 a 60 minutos, utilizando coalho contendo renina e pepsina em uma quantidade de 30mL/100L, mas com adição também de cloreto de cálcio a 50% (25mL/100L). Os cortes no coágulo em forma de gel mole foram feitos com uma lira e posteriormente essa massa foi agitada com pá para liberação do soro.

A coagulação enzimática também foi realizada por Silva *et al.* (2022), através da utilização de 500 g de leite pasteurizado aquecidos até atingir a temperatura de $36,0 \pm 2,0$ °C, para realizar a adição de 0,10 % (m/v) de cloreto de cálcio (40% m/m) e 0,08 % (m/v) de Quimosina microbiana Ha-La®. A coagulação foi realizada em 40 minutos, com a mistura mantida em banho-maria na temperatura de $36,0 \pm 2,0$ °C. Os autores afirmam

que na obtenção de uma mesma concentração de proteína, o tempo de coagulação enzimática aumenta à medida que a concentração de enzima é reduzida.

5.3 Separação e caracterização da caseína

Para separação da caseína, a princípio, tentou-se separar com o auxílio de uma peneira, no entanto devido a caseína ter aspecto bem gelatinoso, não foi possível realizar uma separação efetiva. Outra alternativa, foi tentar separar com o auxílio de uma escumadeira de cozinha doméstica vazada, retirando a caseína aos poucos, como na Figura 12, mas o processo também não foi efetivo.

Figura 12: Tentativa de separação da caseína.



Fonte: Autora (2022).

Por fim, realizou-se testes para separar uma quantidade fixa de soro com o auxílio de uma pipeta graduada, obtendo uma melhor separação. Ao se recolher 60 g de soro a caseína ainda ficou com uma quantidade considerável de soro, e ao se recolher 90 g, em algumas amostras foi possível visualizar a coleta de partes da caseína junto com o soro. Testou-se então a coleta de 70 g de soro cujas observações anteriores não se reproduziram. Foi definida a coleta de 70 g como condição padrão a ser adotada na metodologia.

A dessoragem é uma etapa que precisa ser melhor otimizada em trabalhos futuros, bem como o corte da caseína para liberação do soro. Foi observado que mesmo padronizando o corte em mesmo formato com 1 hora e a dessoragem padrão de 70 gramas, algumas amostras apresentaram diferentes quantidades de soro. o que se deve tanto às variações experimentais na etapa de corte, quanto pela retirada do soro com a pipeta, que por vezes pode retirar também pequenas partículas de caseína que influenciem

na densidade final da mesma. Isso se dá devido a própria estabilização da caseína formada, que por ter aspecto gelatinoso, facilmente se dissolve no soro.

A caseína foi submetida às análises físico-químicas, os resultados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8: Análises na caseína.

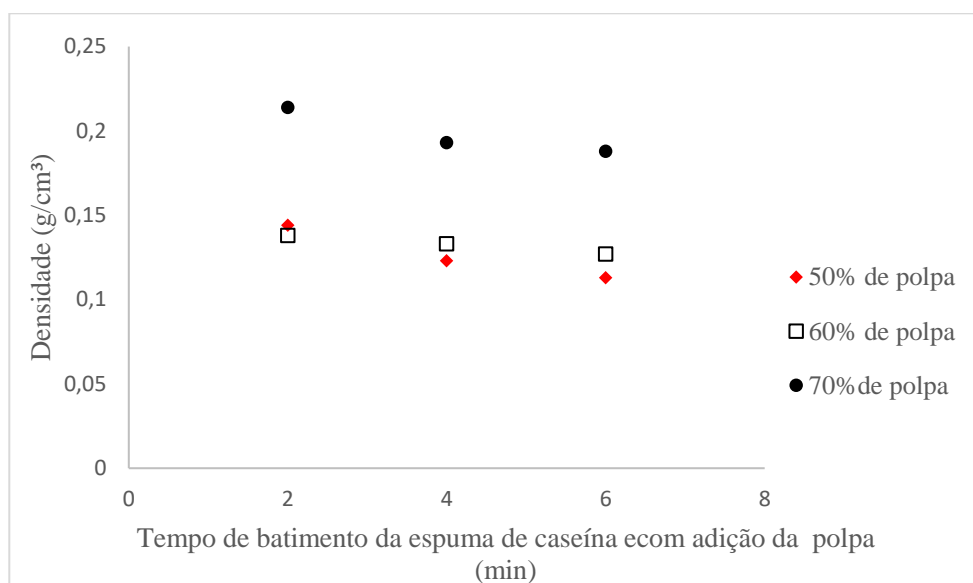
Análise	Valor obtido
Umidade (%)	86,35 ± 0,48
Sólidos Solúveis (°BRIX)	7,93 ± 0,04
Sólidos Totais (%)	13,65 ± 0,48
Densidade (g/cm ³)	1,04 ± 0,002
pH	6,30 ± 0,07

Fonte: Autora (2022).

5.4 Testes iniciais e caracterização das espumas

Para formação da espuma, nos primeiros testes houve variações no tempo de batimento, para verificar qual tempo seria melhor para a metodologia a ser escolhida. Assim, a caseína e a liga neutra (1% sob o total) foram submetidas a agitação máxima por 3 minutos, em seguida foi adicionada a quantidade determinada de polpa de tomate cru a espuma já formada e submetida a um novo batimento por mais 2, 4 e 6 minutos, com a finalidade de avaliar como esse aumento do tempo batimento influenciava na densidade e expansão da espuma. Assim, os tempos totais de batimento foram 5, 7 e 9 minutos. Os testes iniciais foram realizados com a polpa de tomate cru.

Figura 13: Influência do tempo de batimento na densidade da espuma.



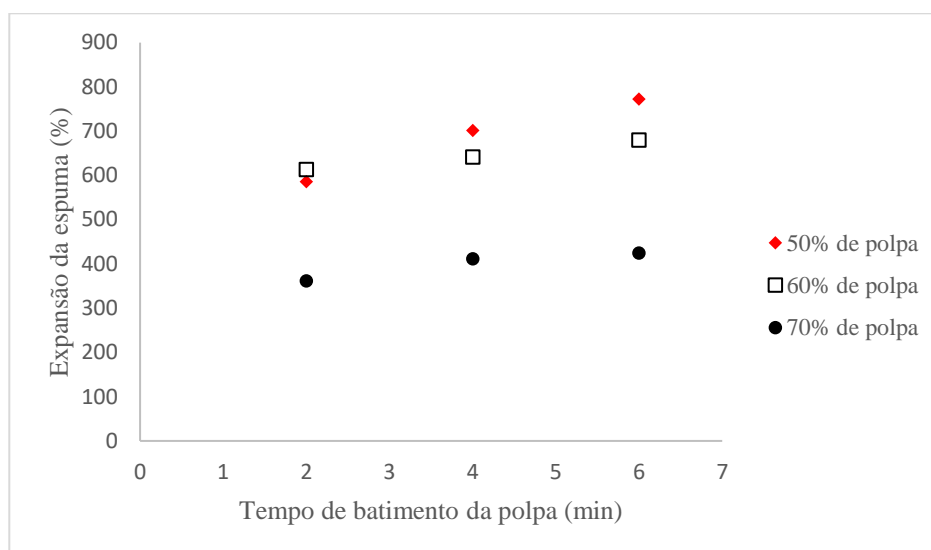
Fonte: Autora (2022).

Com 3 minutos de batimento, a densidade da espuma de caseína foi em média 0,2 g/mL. Após a adição das polpas a densidade foi analisada por meio dos resultados mostrados na Figura 13, onde é possível verificar o aumento considerável da densidade com a adição de 70% de polpa, devido a maior quantidade de polpa adicionada, alterando consideravelmente o volume total que permanece na batadeira para o batimento.

Além disso, é possível perceber a diminuição da densidade com o tempo de batimento, sendo mais aparente nas condições de 50, 60 70% de polpa.

De acordo com Elpídio (2021), a diminuição da densidade com o aumento do tempo de batimento está relacionada a incorporação de ar que ocorre no processo, fazendo com que o ar fique preso no líquido na forma de bolhas. A autora afirma que essa redução da densidade também influencia, conseqüentemente, a expansão e a porosidade da espuma.

Figura 14: Influência do tempo de batimento na expansão.



Fonte: Autora (2022).

Sendo os tempos totais de batimento 5, 7 e 9 minutos nesse método, ao analisar as modificações com o acréscimo no tempo de batimento após a adição da polpa, observa-se o aumento da expansão com o tempo para todas as condições. Na condição de adição de 50% de polpa sobre o total, esse aumento da expansão foi ainda mais considerável, chegando a 772,62% de expansão no tempo de 9 minutos totais. Já para a adição de 70% de polpa sobre o total, as expansões foram menores.

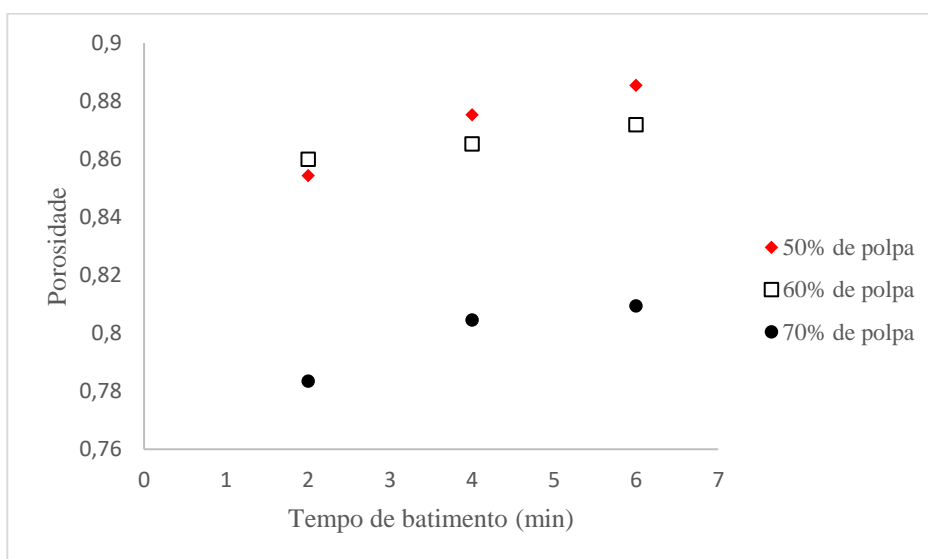
Um comportamento similar foi observado por Araújo (2019) ao analisar a expansão da espuma de polpa de goiaba com adição de Emustab®, que também verificou o aumento da expansão com o tempo. Para um tempo de batimento total de 9 minutos a autora obteve uma expansão de 619,25%, chegando a 656,58% no tempo de 12 minutos. A autora, ainda, observou que apesar da espuma apresentar esse comportamento de expansão com o tempo de batimento, isso ocorre até a mesma atingir o seu volume máximo, e ao chegar nessa condição se houver acréscimo no tempo de batimento a expansão passa a reduzir.

Os valores de expansão obtidos nos diferentes percentuais de polpa no presente trabalho estão relacionados também a massa total presente na batedeira, que enquanto nos testes com polpa de 50% a massa total é de cerca de 303 gramas (150 gramas de caseína, 150 gramas de polpa e 3 gramas de liga neutra), nos testes com polpa de 70% a massa total é cerca de 505 gramas (150 gramas de caseína, 350 gramas de polpa e 5 gramas de

liga neutra), fazendo com que para uma mesma velocidade, a capacidade de incorporação de ar seja diferente.

Outra característica que possui influência direta com a densidade da espuma é a porosidade. A Figura 15 mostra os valores da porosidade obtidos com o aumento do tempo de batimento nas diferentes porcentagens de polpa adicionadas.

Figura 15: Porosidade da espuma em função do tempo de batimento nas diferentes porcentagens de polpa de tomate cru.



Fonte: Autora (2022).

De acordo com a Figura 15 é possível visualizar o aumento da porosidade com o aumento do tempo de batimento, que promove a redução da densidade da espuma e o aumento da expansão, confirmando assim que quanto mais a espuma se expande, mais porosa se torna a espuma devido a incorporação de ar.

Na análise de volume drenado realizada destas espumas para as diferentes concentrações de polpa e diferentes tempos de batimento, não foi observado volume drenado em nenhuma das condições ao ser aplicada a metodologia descrita no tópico 4.6.8.

Apesar das elevadas expansões e porosidades observadas para a maioria das condições, ao se realizar os testes preliminares para o estudo cinética de secagem verificou-se que a espuma estava coalescendo de maneira rápida ao entrar em contato

com ar quente, formando uma quantidade de água no fundo da placa e grudando bastante o pó no fundo da mesma.

Devido a isso, outros testes foram realizados com o método descrito por Santos (2022) em produções de espumas de umbu, jaboticaba e siriguela. O método consiste no batimento da caseína com a liga neutra por 5 minutos, também a 1% sob o total, e posteriormente a adição da porcentagem de polpa e realização do batimento por 2 minutos. Os resultados da aplicação desse método encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9: Expansão da espuma de polpa de tomate cru pelo método descrito por Santos (2022).

Concentração de polpa de tomate cru adicionada (%)	Umidade (%)	Densidade (g/cm ³)	Expansão da espuma (%)	Porosidade
50	92,70	0,11 ± 0,002	826,95 ± 19,68	0,89 ± 0,002
70	92,01	0,14 ± 0,001	585,60 ± 7,51	0,85 ± 0,001

Fonte: Autora (2022).

Assim, como é possível verificar na Tabela 8, esse método proporcionou melhores expansões, e conseqüentemente maiores valores para porosidade, sendo por esse motivo o método escolhido para produção das espumas no presente estudo. Valores similares foram observados por Elpídio (2021) na formação de espuma de ameixa, obtendo expansões de 506,06 a 804,45% e porosidade de 0,83 a 0,89 em diferentes tempos de e diferentes concentrações de albumina (3, 5 e 7%).

A análise da expansão da espuma e da porosidade são fundamentais na eficiência da secagem, pois o aumento da área de contato facilita as trocas térmicas e reduz o tempo de secagem, otimizando o processo.

Na análise de volume drenado realizada nas espumas que passaram pela aplicação desse método, para as diferentes concentrações de polpa e diferentes tempos de batimento, não foi observado volume drenado ao ser aplicada a metodologia descrita no tópico 4.6.8 em nenhuma das condições. A espuma obtida a partir do batimento com 5 minutos da caseína pura com liga neutra (1% sobre o total) encontra-se na Figura 16. Já na Figura 17, tem-se a espuma obtida após a adição de 50% de polpa de tomate cru e batimento por mais 2 minutos.

Figura 16: Espuma da caseína pura.



Fonte: Autora (2022).

Figura 17: Espuma da caseína com polpa 50% de tomate cru.



Fonte: Autora (2022).

5.5 Obtenção das espumas dos experimentos de secagem

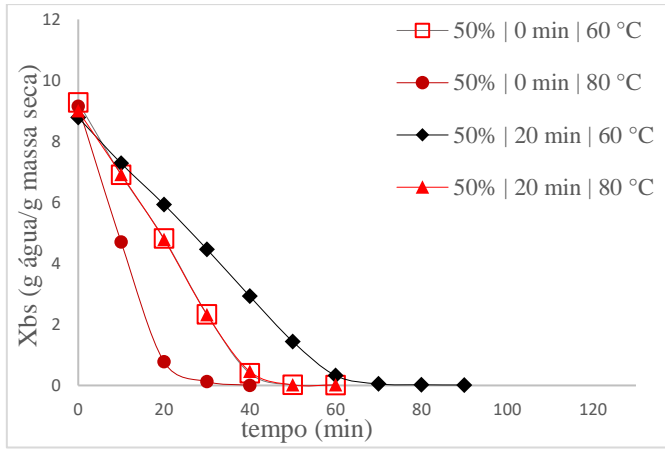
A metodologia escolhida por meio das análises preliminares realizadas no tópico anterior foi aplicada para as polpas de tomate cru, tomate cozido por 10 minutos e tomate cozido por 20 minutos, para realização dos 11 ensaios de secagem. Como os experimentos foram executados em ordem aleatória, houveram algumas modificações na densidade para uma mesma condição experimental, o que se dá devido a preparação da caseína e do processo de separação da mesma, que são etapas que ainda necessitam de otimizações para redução dos erros experimentais.

Para a espuma da polpa tomate cru com 50 e 70% de polpa sobre o total, as densidades variaram de 0,11 a 0,12 g/cm³ e de 0,14 a 0,15 g/cm³, respectivamente. Para a espuma da polpa de tomate com 10 minutos de cozimento e 60% de polpa sobre o total as densidades foram em média de 0,13 a 0,1 g/cm³. Já para a espuma da polpa de tomate com 20 minutos de cozimento e 50 e 70% de polpa sobre o total, as densidades variaram de 0,12 a 0,14 g/cm³ e de 0,16 a 0,18 g/cm³, respectivamente.

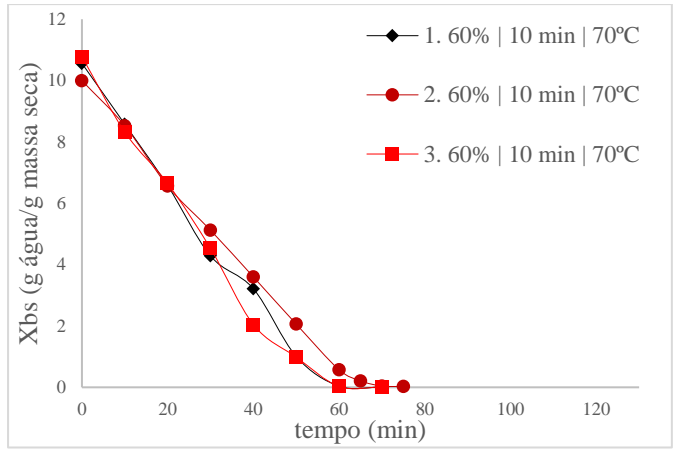
5.6 Secagens pelo método camada de espuma

O delineamento experimental foi aplicado aos 11 ensaios de secagem com as variações definida. A Figura 18 mostra as curvas para as polpas de tomate cru, com 10 e 20 minutos de cozimento nas diferentes proporções de polpa e diferentes condições de secagem.

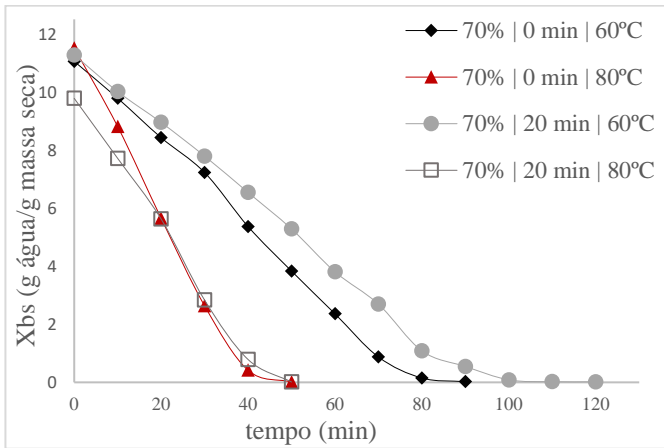
Figura 18: Curvas das cinéticas de secagem para as polpas de tomate (cru ou 0 minutos de cozimento, com 10 e 20 minutos de cozimento) com 50% de polpa (a), 60% de polpa (b) e 70% de polpa (c) em diferentes condições de secagem. Curvas das taxas de secagem (dX/dt) pela umidade para as polpas de tomate (cru, com 10 e 20 minutos de cozimento) com 50% de polpa (d), 60% de polpa (e) e 70% de polpa (f) em diferentes condições de secagem.



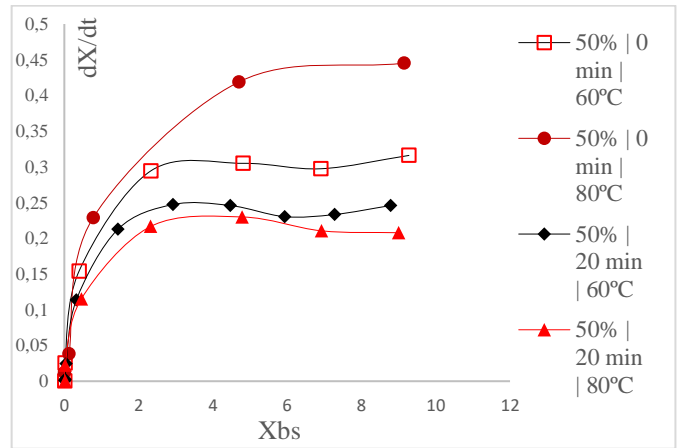
(a)



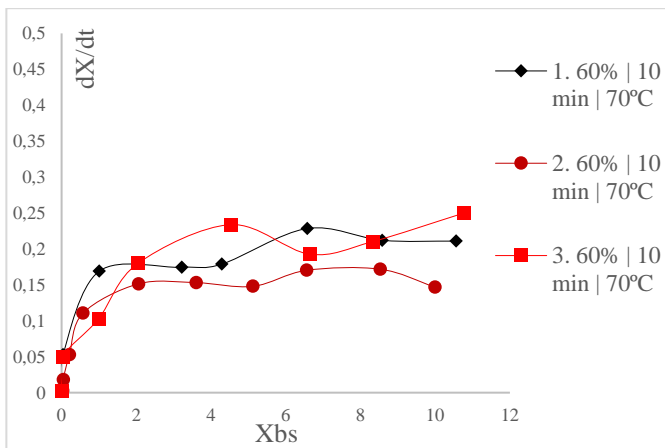
(b)



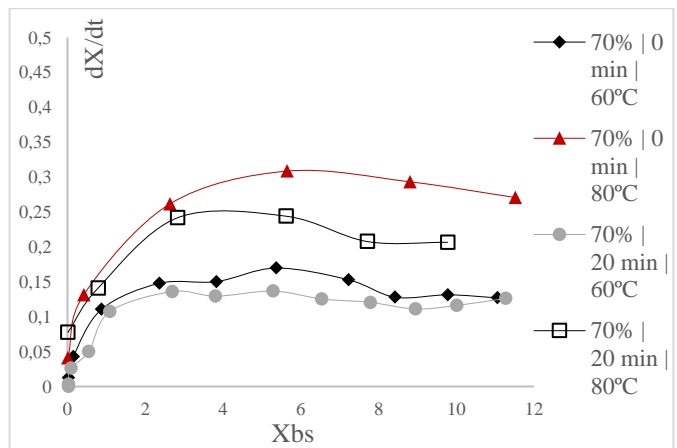
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autora (2022).

De acordo com a Figura 18 (a) é possível visualizar pela linearidade dos pontos um período de taxa de secagem constante, que se alonga principalmente para a secagem da polpa cozida por 20 minutos. Nesse período, as transferências de calor e massa entre a superfície do material e o ar de secagem são predominantes, podendo-se desprezar as resistências internas ao transporte de massa. Um comportamento similar foi observado por Santos (2022) na secagem de polpa de siriguela com 50% de polpa para a mesma metodologia de preparação de espuma utilizada no presente trabalho. Verifica-se ainda a influência dos fatores combinados temperatura e tempo de cozimento ao se observar que as curvas de secagem a 50°C da espuma com 50 % de polpa de polpa crua coincide com a curva de secagem da espuma com 50% de polpa cozida a 80 °C. Ou seja o efeito da maior temperatura anula o efeito do cozimento.

Ainda em (a), a influência da temperatura de secagem pode ser visualizada, principalmente, para a condição de 50% de polpa de tomate cru a 80 °C, onde as condições de equilíbrio foram atingidas em apenas 40 minutos de secagem. A influência da expansão e da porosidade da espuma também é confirmada no comportamento das curvas de secagem da espuma com menor percentual de polpa (50%) de tomate cru, com elevados valores de expansão e porosidade quando comparadas com a secagem da espuma com 50% de tomate e 20 minutos de cozimento para a mesma condição de temperatura;

A Figura 18 (b) mostra as réplicas realizadas no ponto central, na mesma condição de cozimento da polpa, 10 minutos, e na mesma condição de temperatura de secagem, 70 °C. É possível visualizar que houveram desvios nas curvas de secagem, principalmente no período de taxa decrescente, que são decorrentes das variações experimentais nas etapas de separação da caseína e preparo da espuma, etapas essas, que precisam ser otimizadas em pesquisas futuras afim de proporcionarem uma maior segurança experimental.

A Figura 18 (c) mostra que o efeito do tempo de cozimento nas polpas de tomate é menos intenso na secagem de espumas com a composição de 70% de polpa e 30% de caseína, principalmente para a temperatura de 80°C uma vez que para as mesmas condições de temperatura, as curvas de secagem da espuma com polpa de tomate cru ou com 20 minutos de cozimento praticamente ficaram sobrepostas principalmente na etapa final do processo. Para a temperatura de 60 °C, o efeito da temperatura não se sobrepõe ao do tempo de cozimento e a secagem é mais rápida para a espuma com adição da polpa crua.

A influência do aumento da temperatura no tempo de secagem foi observada por Araújo (2019), ao avaliar a secagem de polpa de goiaba pelo método *foam-mat* nas temperaturas 50, 60 e 70 °C, que obteve menores tempos de secagem na temperatura de 70 °C.

A Figura 18 (d) representa a relação da taxa de secagem com a umidade ao longo da secagem para as espumas formadas a partir de 50% de polpa de tomate cru e com 20 minutos de cozimento, para as temperaturas de secagem de 60 e 80 °C. Por meio dele, é possível perceber que as curvas das taxas de secagem corroboram com as curvas de secagem, observando-se o período de taxa constante bastante evidente.

Ainda, pelo a Figura 18 (d) é possível visualizar maiores taxas de secagem nas espumas de polpa de tomate cru, principalmente na temperatura de secagem de 80 °C, que apresentou uma taxa de secagem de 0,445 (g de água/g de massa seca)*min⁻¹, sendo a maior de todos os ensaios. A influência da temperatura de secagem é observada no período de taxa decrescente, que é atingido rapidamente nas temperaturas de 80 °C, atingindo o equilíbrio em um tempo mais curto.

A Figura 18 (e) mostra as réplicas realizadas no ponto central, relacionando a relação da taxa de secagem com a umidade ao longo da secagem para as espumas formadas a partir de 60% de polpa com 10 minutos de cozimento e na mesma condição de temperatura de secagem, 70 °C. Nele, é possível visualizar melhor os problemas de reprodutibilidade que ocorreram devido o procedimento experimental adotado para a produção das espumas.

A Figura 18 (f) tem-se a relação da taxa de secagem com a umidade ao longo da secagem para as espumas formadas a partir de 70% de polpa de tomate cru e com 20 minutos de cozimento, para as temperaturas de secagem de 60 e 80 °C. É perceptível que para essa porcentagem de polpa a taxa constante é observada em períodos mais curtos, coincidindo com o período de aquecimento das espumas.

Nessas formulações de 70% de polpa, para o tempo de secagem de 60 °C percebe-se uma menor influência do tempo de cozimento, uma vez que nessa temperatura as taxas de secagem para as espumas com 0 e 20 minutos de cozimento apresentaram valores similares durante toda a secagem.

Relacionando a Figura 18 (d) e (f) é possível perceber que a porcentagem de polpa influenciou de maneira direta na taxa de secagem, visto que para as mesmas condições de tempo de cozimento e temperatura de secagem, as espumas formadas com 50% de polpa apresentaram taxas significativamente mais altas quando comparadas com as espumas

formadas com 70% de polpa. Isso se justifica pelas maiores expansões das espumas com 50% de polpa de tomate cru e maiores valores de porosidade, que facilitam as trocas térmicas e aumentam a velocidade da secagem.

5.7 Ajustes dos modelos matemáticos

Os modelos matemáticos de Lewis (1921), Page (1949), Fick (placa plana; truncado no 1º termo), logarítmico e Midilli *et al.* (2002) foram aplicados aos dados experimentais da razão de umidade com o tempo obtidos em todas as condições do planejamento experimental utilizando-se o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulusa, Oklahoma, Estados Unidos) utilizando um intervalo de confiança de 95%, afim de visualizar qual modelo matemático melhor se ajustou aos dados experimentais. Os valores para R², RQMR e dos parâmetros dos modelos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: R², RQMR e parâmetros para os modelos matemáticos aplicados.

MODELOS Condição	PAGE				LEWIS		
	R ²	RQMR	n	k _p	R ²	RQMR	k _L
1. Tomate cru 50% 60°C	0,99141	0,03422	1,71135	0,004404	0,94263	0,08845	0,04543
2. Tomate cru 70% 60°C	0,98989	0,03529	1,85216	8,34E-04	0,91057	0,10497	0,02257
3. Tomate cru 50% 80°C	0,99991	0,00366	1,87831	8,84E-03	0,97128	0,06571	0,08931
4. Tomate cru 70% 80°C	0,99503	0,02607	1,76499	3,87E-03	0,93671	0,09307	0,04559
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,98806	0,03863	1,61179	3,81E-03	0,94007	0,08653	0,03332
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,98853	0,03794	1,72045	2,09E-03	0,92694	0,09574	0,03035
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,98889	0,03732	1,61174	4,17E-03	0,94442	0,08346	0,03552
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	0,99128	0,03341	1,72018	2,16E-03	0,93617	0,09040	0,03042
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	0,98877	0,03714	1,78850	7,89E-04	0,91849	0,10008	0,01951
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	0,99349	0,03006	1,79229	3,26E-03	0,93655	0,09383	0,04424
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	0,99183	0,03296	1,85591	2,38E-03	0,92095	0,10255	0,04026

(a)

MODELOS	LOGARÍTIMICO				
	Condição	R ²	RQMR	a	k _{LOG}
1. Tomate cru 50% 60°C	0,98086	0,05109	1,35675	0,02737	-0,3255
2. Tomate cru 70% 60°C	0,98959	0,03581	2,68975	0,00581	-1,6573
3. Tomate cru 50% 80°C	0,98242	0,05141	1,1195	0,07148	-0,1040
4. Tomate cru 70% 80°C	0,98814	0,04028	1,70584	0,01986	-0,6792
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,98990	0,03925	1,63355	0,01532	-0,6106
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,99382	0,02784	1,98023	0,01045	-0,9560
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,98759	0,03943	1,47479	0,01864	-0,4540
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	0,98037	0,05013	1,3727	0,01859	-0,3286
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	0,98398	0,04437	1,73792	0,08603	-0,6964
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	0,97916	0,05378	1,40315	0,02570	-0,3658
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	0,98961	0,03718	2,63962	0,01029	-1,6174

(b)

MODELOS	MIDILLI					
	Condição	R ²	RQMR	a	k _M	B
1. Tomate cru 50% 60°C	0,99351	0,02974	0,984028	0,004712	-6,30E-04	1,6641
2. Tomate cru 70% 60°C	0,99638	0,02113	0,976672	0,00112	-0,00123	1,71218
3. Tomate cru 50% 80°C	0,99994	0,00310	1,00006	0,008591	9,23E-05	1,89162
4. Tomate cru 70% 80°C	0,99762	0,01804	0,993524	0,005159	-0,00123	1,63575
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,99374	0,02797	0,992491	0,006254	-0,00157	1,41202
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,99654	0,02084	0,992974	0,004632	-0,002	1,42133
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,99317	0,02926	0,98048	0,00529	-0,00102	1,49869
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	0,99410	0,02748	0,969217	0,001856	-4,00E-04	1,73426
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	0,99433	0,02639	0,959317	6,52E-04	-5,10E-04	1,79369
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	0,99518	0,02585	0,984103	0,003346	-5,50E-04	1,76036
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	0,99653	0,02148	0,98926	0,003578	-0,00207	1,66518

(c)

MODELOS	FICK		
	Condição	R ²	RQMR
1. Tomate cru 50% 60°C	0,86245	0,13696	0,009916
2. Tomate cru 70% 60°C	0,80199	0,15619	0,004752
3. Tomate cru 50% 80°C	0,90845	0,11733	0,020042
4. Tomate cru 70% 80°C	0,84382	0,14620	0,09834
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,84831	0,13767	0,007128
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,83811	0,14252	0,006596
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,85941	0,13273	0,007645
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	0,80199	0,13737	0,004752
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	0,82206	0,14787	0,004164
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	0,85304	0,14279	0,00965
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	0,81756	0,15579	0,008565

(d)

Fonte: Autora (2022).

Sabe-se que para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais deve-se observar qual modelo apresentou valores mais altos para R² e valores mais baixos para RQMR (Franco *et al.*, 2015). De acordo com os valores é possível observar que o modelo de Fick foi o que proporcionou um menor ajuste aos dados experimentais, com valor de R² maior que 0,9 apenas em apenas uma das condições, e com valores de RQMR variando de 0,11733 a 0,15579.

Na Tabela 8 (d) é possível verificar os valores dos coeficientes de difusividade efetiva obtidos da aplicação do modelo de Fick truncado no primeiro termo. De acordo com Elpídio (2021), na secagem ocorrem mudanças na difusividade efetiva e essas mudanças são decorrentes da dependência de outras variáveis, como a porosidade, densidade da espuma e a temperatura. A autora afirma que nas temperaturas mais elevadas em decorrência da maior pressão podem proporcionar valores mais altos para difusividade efetiva. No presente trabalho, observou-se esse comportamento, uma vez que para as mesmas condições de porcentagem de polpa, o aumento da temperatura proporcionou valores mais altos para Def.

O modelo de Lewis, apesar de apresentarem valores maiores que 0,9 para R², não apresentou um ajuste tão significativo quando comparado aos outros modelos aplicados,

uma vez que apresentou valores para RQMR variando de 0,06571 a 0,10497. O modelo logarítmico, apresentou bons valores para R^2 , mas em escala comparativa com os demais modelos aplicados seu ajuste foi razoável.

Os modelos que apresentaram melhores valores para R^2 e menores valores para RQMR foram os modelos de Page e Midilli. O modelo de Page teve o R^2 variando de 0,98853 a 0,99503, e o RQMR de 0,00366 a 0,03863. Já o de Midilli, teve o R^2 variando de 0,99317 a 0,99994, e o RQMR de 0,00310 a 0,02974. Assim, ambos apresentaram bons ajustes, no entanto o de Midilli ainda foi considerado o modelo que mais se ajustou aos dados experimentais.

Araújo *et al.* (2017) no ajuste dos modelos matemáticos para secagem de acerola em leito de espuma nas temperaturas de 50, 55, 60, 65 e 70 °C, testou os modelos matemáticos de Page, Henderson e Pabis e Lewis. Os autores observaram que o modelo que mais se ajustou aos dados foi o de Page, com valores de R^2 maiores que 0,99 e valores de erro padrão menores que 0,03.

Marques (2009), no ajuste dos modelos matemáticos para secagem de caldo de cana nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, testou os modelos de Page, Henderson e Newton. O autor observou que o modelo de Page foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, com valores para R^2 maiores que 0,9975.

Silva *et al.* (2008) no ajuste dos modelos matemáticos para secagem de espuma de tamarindo nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C, testou os modelos de Page, Henderson e Pabis, Midilli e Kucuk. Os autores obtiveram como melhores modelos o de Midilli e Kucuk, apresentando menores erros e R^2 maiores que 0,99.

Na literatura, Floriano *et al.* (2006), menciona que para escolher o modelo que se ajusta melhor aos dados amostrais pela soma de quadrados do erro nem sempre é possível. Assim, para obter uma maior relevância matemática a respeito dos valores experimentais, foi aplicado o critério de Akaike (AIC), comparando os modelos de Midilli e de Page. Os valores para a aplicação do critério encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados do critério de Akaike.

MODELOS	PAGE		MIDILLI	
	AIC	SE	AIC	SE
1. Tomate cru 50% 60°C	-43,2489	0,04049	-41,2144	0,03519

2. Tomate cru 70% 60°C	-62,8823	0,03946	-69,1392	0,02363
3. Tomate cru 50% 80°C	-52,0917	0,00473	-49,7659	0,00400
4. Tomate cru 70% 80°C	-39,7628	0,03193	-40,1842	0,02209
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	-48,0617	0,04460	-49,2233	0,03230
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	-61,4356	0,04242	-69,4221	0,02329
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	-48,6121	0,04309	-48,5019	0,03379
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	-63,9781	0,03735	-63,8847	0,03073
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	-81,6173	0,04038	-86,5005	0,02869
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	-45,064	0,03557	-43,1768	0,03058
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	-36,9488	0,04037	-38,0885	0,02631

Fonte: Autora (2022).

Analisando os valores de AIC e SE é possível visualizar que para as condições com 50% de polpa, 1, 3, 8 e 10, e para a condição 7 do ponto central, o modelo de Page apresentou valores mais negativos para AIC. No entanto, mesmo nessas condições em que o Page aparentou ser melhor, o modelo de Midilli apresentou valores bastante próximos aos obtidos para o AIC para o Page.

Nas demais condições, o modelo de Midilli apresentou valores mais negativos para o AIC, sendo considerado um melhor ajuste. Ainda, em todas as 11 condições o modelo de Midilli apresentou menores valores para SE, assim, apresentando menores erros.

Com isso, levando em consideração a análise conjunta de ambos os resultados matemáticos, o modelo de Midilli pode ser apontado como o que obteve um melhor ajuste aos dados experimentais, uma vez que apresentou valores mais negativos para AIC na maioria das condições, menores erros em todas as condições e maiores valores para R^2 em todas as condições.

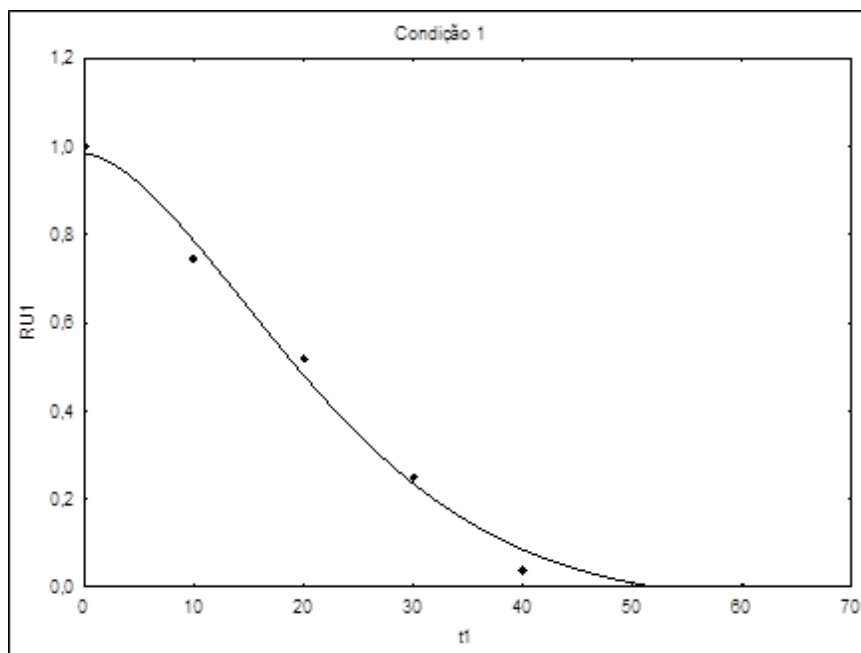
Pelos valores demonstrados na Tabela 8 (c) é possível observar a influência do aumento da temperatura na constante cinética, onde para uma mesma condição de tempo de cozimento, as maiores temperaturas apresentaram valores maiores. Esse comportamento também foi observado por Silva *et al.* (2008) ao analisar os valores da constante cinética para o modelo de Midilli.

Ainda, é possível observar a influência do tempo de cozimento na constante cinética, uma vez que quanto maior o tempo de cozimento da polpa, menor a umidade e

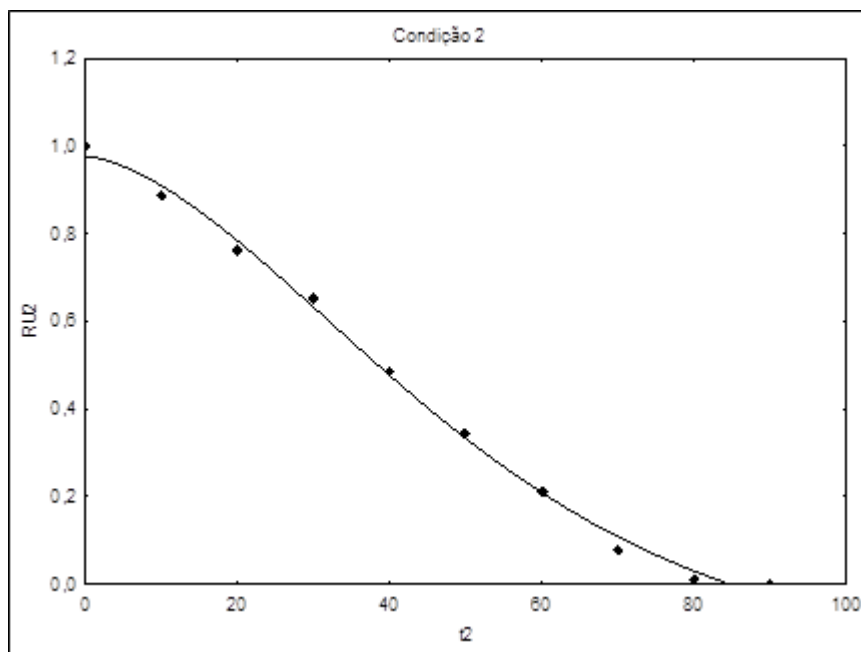
consequentemente menor água disponível, assim, para uma mesma porcentagem de polpa e temperatura, as polpas com 20 minutos de cozimento apresentaram menores constantes cinéticas.

Os gráficos das aplicações do modelo de Midilli encontram-se nas Figuras 19, 20 e 21, e por meio deles é possível confirmar visualmente o quanto os dados experimentais apresentaram bons resultados para esse modelo, uma vez que para a maioria das condições o ajuste ficou bastante satisfatório para todos os pontos.

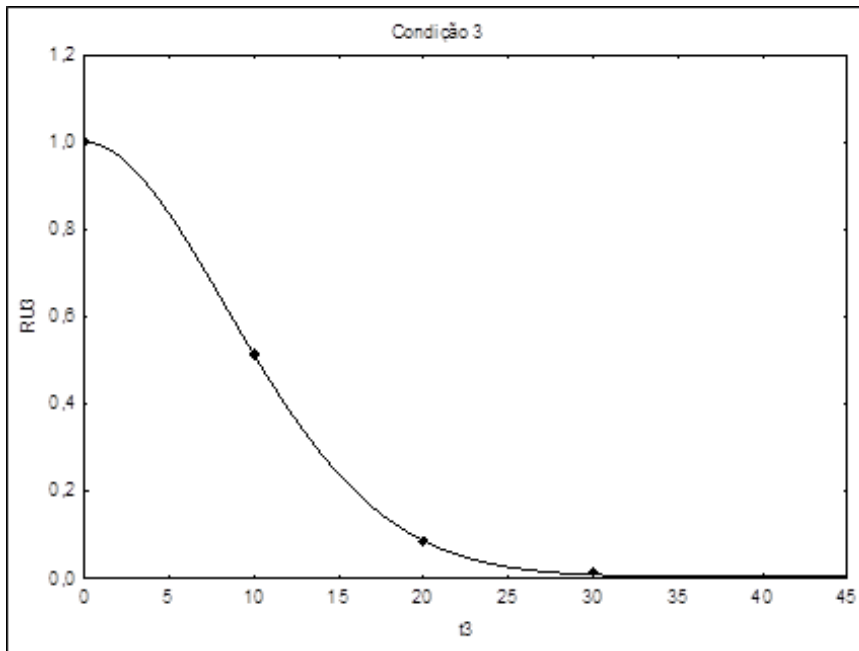
Figura 19: Aplicação do modelo de Midilli para tomate cru nas condições de 1(a), 2(b), 3(c) e 4(d) da Tabela 4.



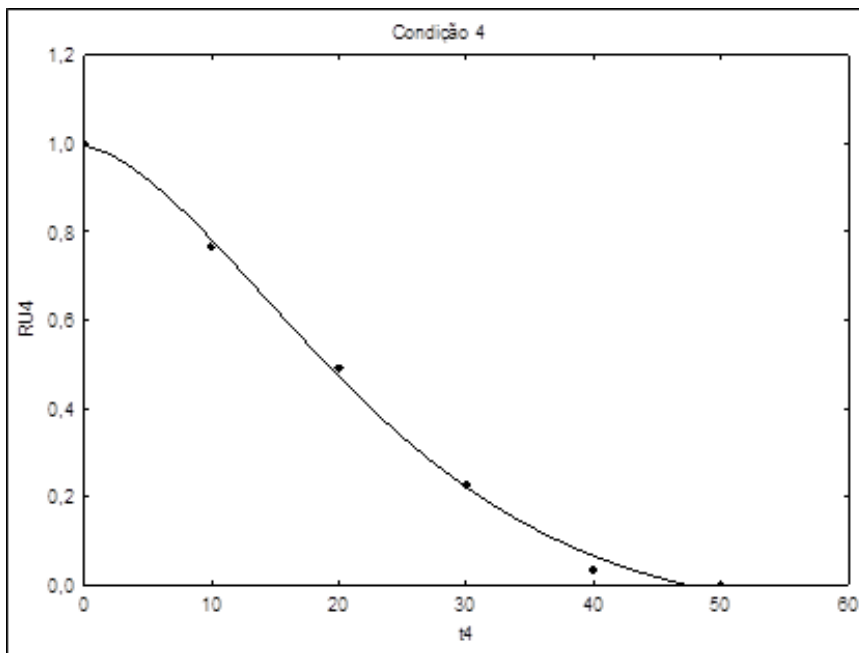
(a)



(b)

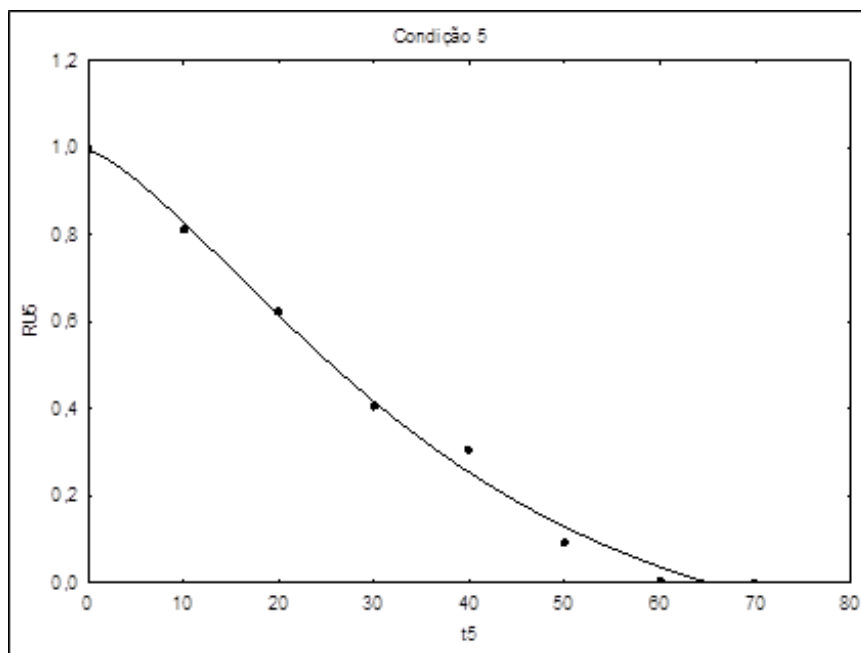


(c)

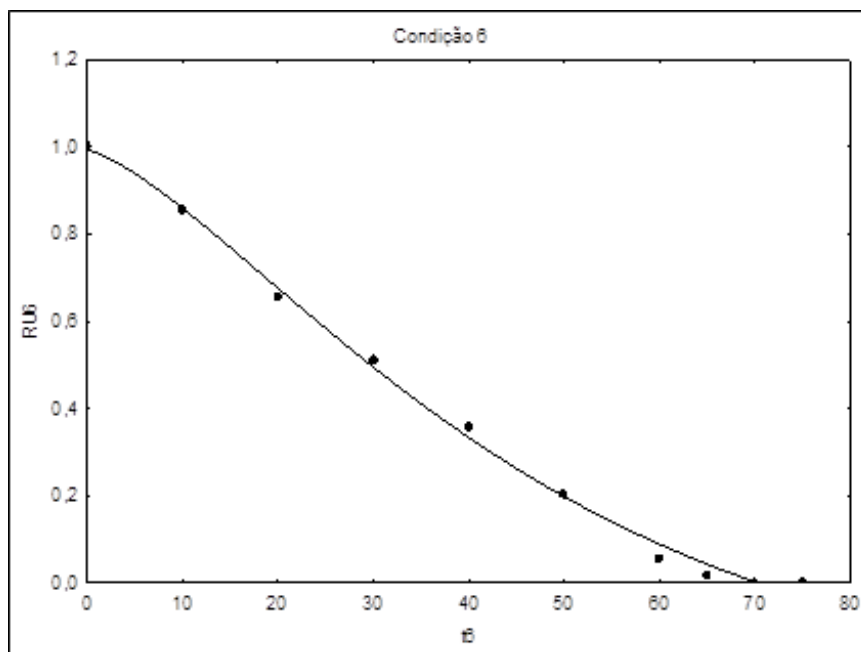


Fonte: Autora (2022).

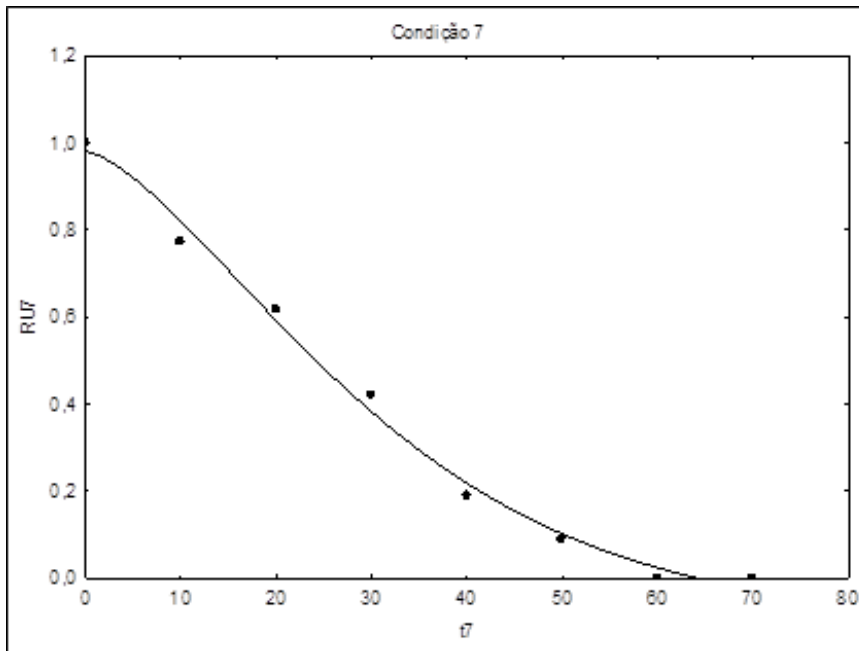
Figura 20: Aplicação do modelo de Midilli para tomate com 10 minutos de cozimento nas réplicas do ponto central, 5 (a), 6 (b) e 7 (c).



(a)



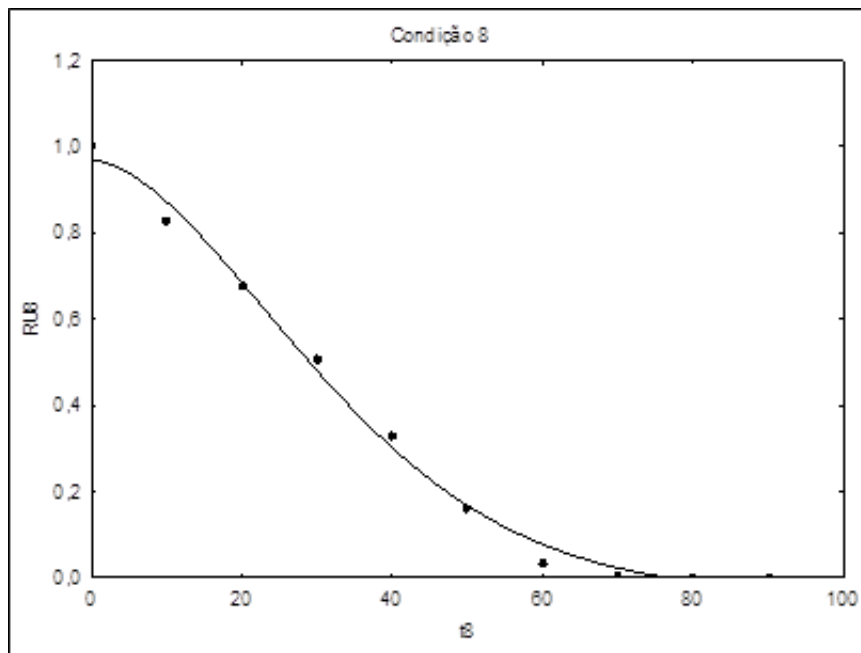
(b)



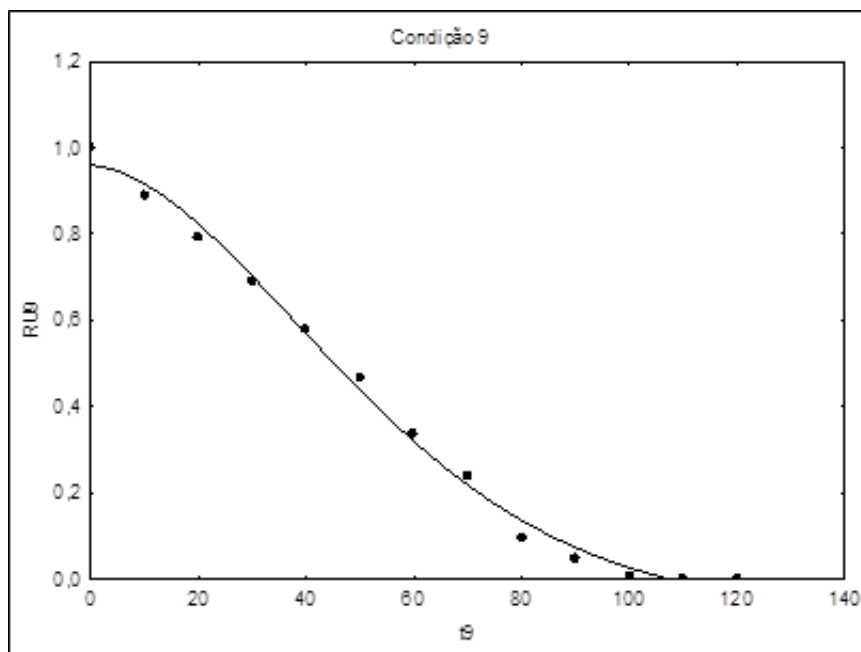
(c)

Fonte: Autora (2022).

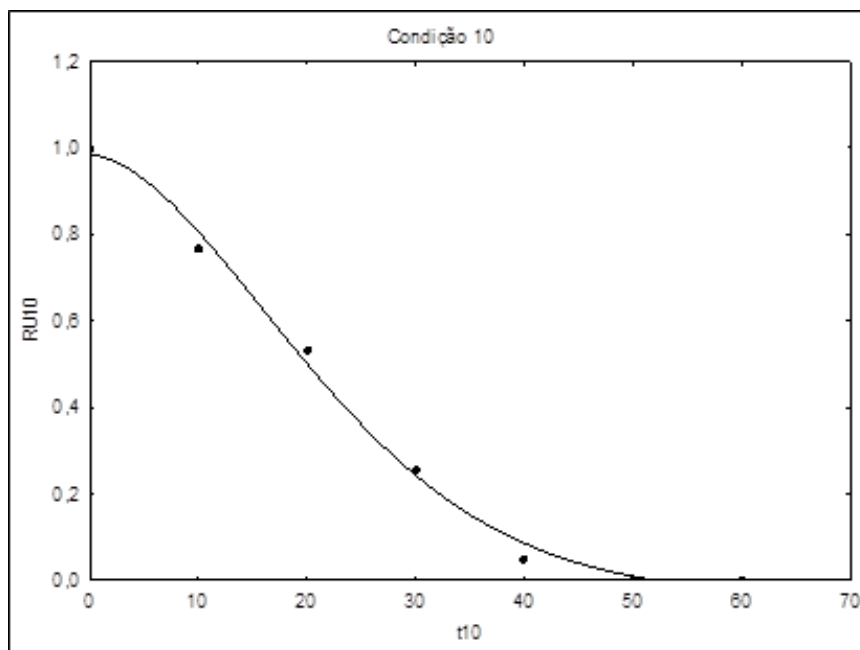
Figura 21: Aplicação do modelo de Midilli para tomate com 20 minutos de cozimento nas condições de 8 (a), 9 (b), 10 (c) e 11 (d) da Tabela 4.



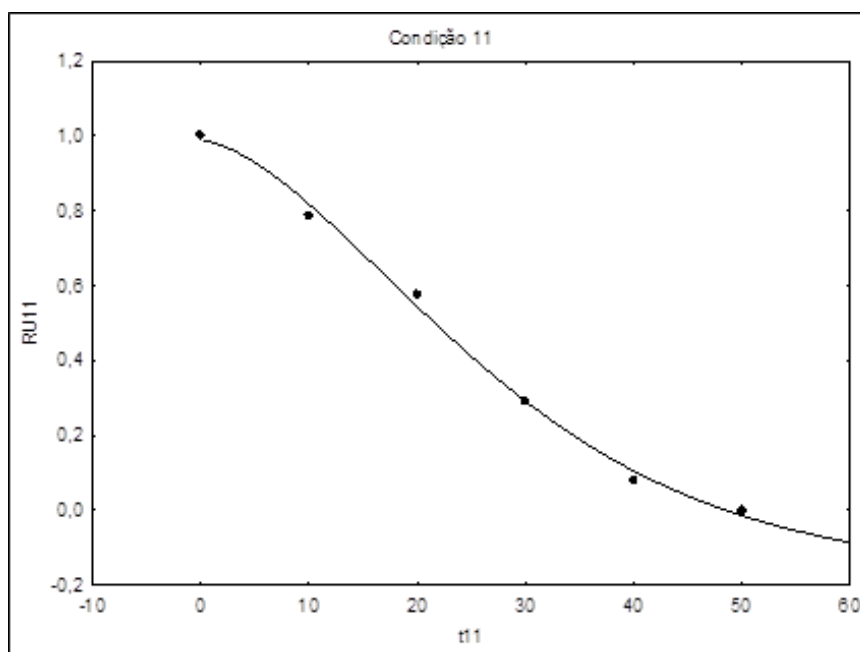
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2022).

Uma vez escolhido como o modelo de melhor ajuste, a equação do modelo de Midilli foi utilizada para estimar dados referentes ao comportamento da secagem. Nesse estudo, estimou-se o tempo de secagem necessário para a espuma atingir uma umidade final de 0,04 em base seca. Esse valor foi escolhido visto que é um valor de umidade compatível para pós de frutas na literatura, o que otimizaria o tempo de produção. Os resultados relativos a estimativa deste tempo utilizando o modelo de Midilli encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12: Tempo estimado pelo modelo de Midilli para atingir 4% de umidade final.

Condição	tmid (min)
1. Tomate cru 50% 60°C	51,7
2. Tomate cru 70% 60°C	84,4
3. Tomate cru 50% 80°C	35,0
4. Tomate cru 70% 80°C	46,9
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	64,6
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	70,1
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	63,6
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	75,7
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	106,7
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	51,5
11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	48,1

Fonte: Autora (2022).

5.8 Caracterização dos pós obtidos

Para a caracterização dos pós foram avaliados os resultados de umidade, higroscopicidade e atividade de água para os pós obtidos nas 11 condições. Os valores encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13: Análises físico-químicas nos pós.

Condição	Atividade de H ₂ O	Umidade do pó base seca (%)	Higroscopicidade (%)
1. Tomate cru 0 min 50% 60°C	0,359	1,41	13,11
2. Tomate cru 0 min 70% 60°C	0,313	2,17	23,67
3. Tomate cru 0 min 50% 80°C	0,328	0,39	16,96
4. Tomate cru 0 min 70% 80°C	0,339	1,79	23,62
5. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,306	0,83	18,04
6. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,367	2,68	19,92
7. Tomate coz 10 min 60% 70°C	0,335	1,04	20,03
8. Tomate coz 20 min 50% 60°C	0,309	1,46	19,35
9. Tomate coz 20 min 70% 60°C	0,324	1,98	33,67
10. Tomate coz 20 min 50% 80°C	0,338	1,62	16,52

11. Tomate coz 20 min 70% 80°C	0,307	1,164	22,052
------------------------------------	-------	-------	--------

Fonte: Autora (2022).

A formação dos pós por meio da desidratação permite que o produto aumente sua vida útil, pois quando a água é retirada a atividade de água é diminuída, reduzindo o tempo de deteriorização do produto e facilitando as etapas de armazenamento e transporte.

De acordo com Castoldi (2012), a atividade de água representa o quanto a água livre está disponível num alimento, uma vez que quanto maior essa quantidade mais suscetível fica o alimento a proliferação de micro-organismo, sendo assim, a atividade de água é um parâmetro de qualidade e segurança dos produtos. A autora menciona que o limite inferior para todos os micro-organismos é atividade de água ser menor que 0,6, apesar de que valores de 0,1 podem reduzir a vida útil dos alimentos de duas a três vezes.

Analisando valores obtidos na literatura para esse parâmetro, Castoldi (2012), obteve pós de tomate em secagem por refractance window® em temperaturas de secagem 65 a 95 °C com atividade de água em torno de 0,2. Machado (2010) na secagem de tomate por *spray dryer* obteve pós com atividades de água entre 0,107 e 0,132, utilizando altas temperaturas de secagem, de 160 a 180 °C.

No presente trabalho, a atividade de água dos pós variou entre 0,306 a 0,367, em temperaturas de secagem entre 60 a 80°C, que apesar de apresentarem valores mais elevados que os mencionados anteriormente para o tomate em outros métodos de secagem, ainda se encontra na faixa inferior ao limite para crescimento microbológico, sendo compatíveis para condições de armazenamento.

Em relação a umidade, este parâmetro está diretamente relacionado com o tempo de vida do produto, pois produtos muito úmidos tendem a estragarem mais rápido. Todos os pós apresentaram umidades significativamente baixas, sendo a umidade mais alta de 2,68%, que ainda é um valor bastante baixo quando comparado a outros pós obtidos pelo método camada de espuma. Santos (2022), na secagem de jaboticaba pelo mesmo método descrito no presente trabalho, obteve umidades de 3,267 e 3,260% para as espumas preparadas com 50 e 70% de polpa, respectivamente.

Para a umidade no ponto central, mais uma vez verifica-se a não reprodutibilidade dos dados. Para as demais condições, em maiores temperaturas observou-se menores valores finais para as umidades dos pós, com exceção do tomate cozido com 70% de

polpa e 20 minutos de cozimento, que apresentou menor valor de umidade para a temperatura de 60 °C quando comparado a de 80 °C.

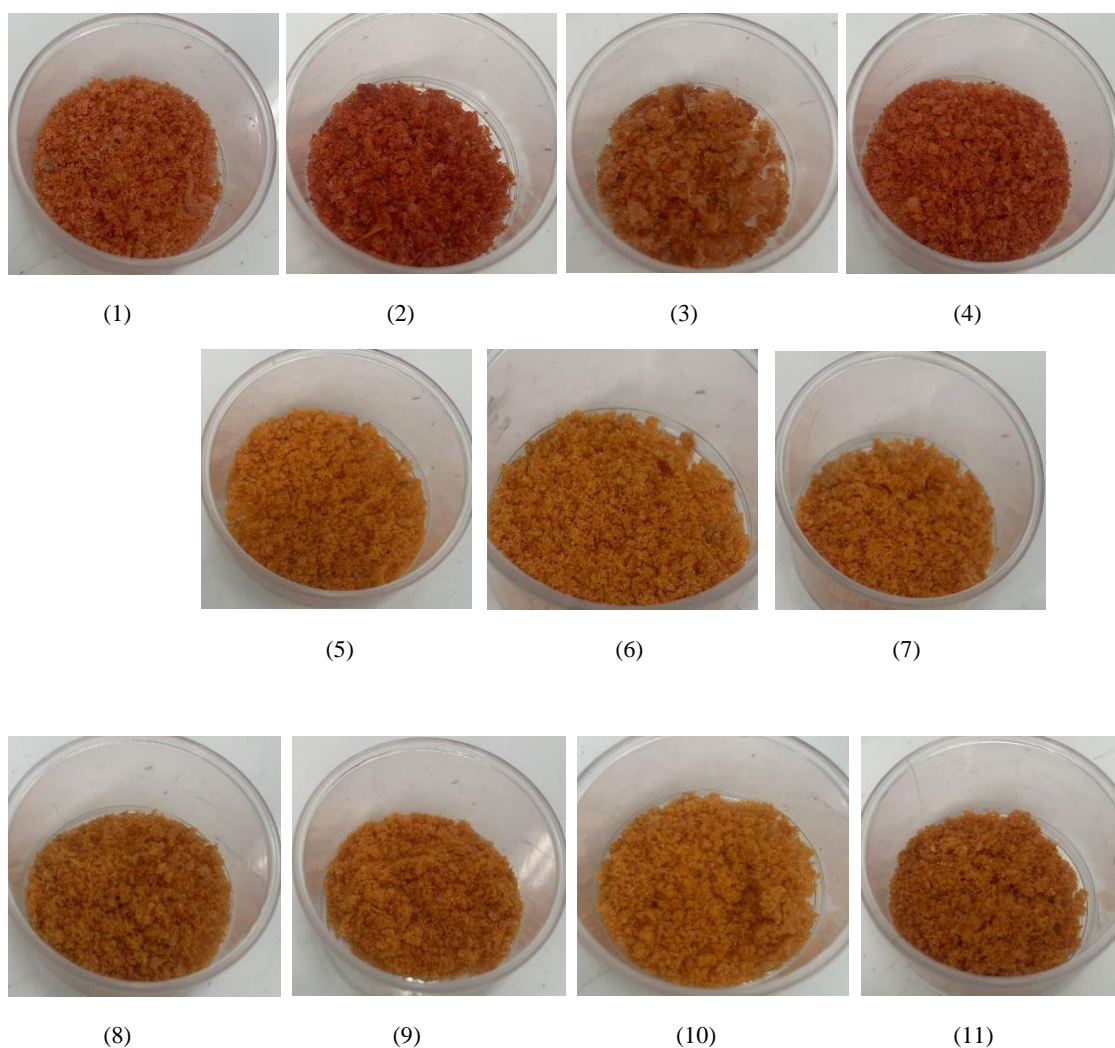
Na literatura, no estudo das características físico-químicas do tomate em pó durante o armazenamento por Pereira *et al.* (2006), os autores mencionam a faixa de valores de umidade final entre 11 a 14% para que se evite o aparecimento de micro-organismos e consequentemente mantenha a qualidade do produto em pó.

Quanto a higroscopicidade, Oliveira *et al.* (2012) menciona que é a capacidade que um alimento em pó tem de absorver a umidade do ambiente no qual está inserido, sendo então um parâmetro diretamente relacionado com a qualidade do produto final. A classificação quanto a esse parâmetro encontra-se na Tabela 13.

No presente trabalho, para os pós de tomate cru com 50% de polpa, a higroscopicidade variou de 13,11 a 16,97%, sendo levemente higroscópico e higroscópico, respectivamente. Para as polpas com 70% de tomate cru, variou de 23,62 a 23,67%, sendo muito higroscópicos. No ponto central, os pós de tomate com 10 minutos de cozimento e 60% de polpa, foram higroscópicos. Já nos pós de tomate com 20 minutos de cozimento para 50% de polpa variou de 16,52 a 19,35%, sendo higroscópicos, e para 70% de polpa variou de 22,05 a 33,67%, sendo muito higroscópico e extremamente higroscópico, respectivamente.

Os altos valores para higroscopicidade observados no presente trabalho podem se dá devido a influência das condições de armazenamento, fazendo com que o material em pó estivesse propício a absorver mais facilmente a umidade do ambiente externo. Outro fator que se observa é a influência do tempo de cozimento na higroscopicidade, à medida que os pós com maiores tempos de cozimento foram mais higroscópicos.

Figura 22: Pós obtidos nos 11 experimentos de secagem de acordo com as condições detalhadas na Tabela 12.



Fonte: Autora (2022).

A Figura 22 mostra os pós obtidos nos experimentos de acordo com as condições indicadas por numeração na Tabela 9. Por meio dela, é possível visualizar que o tempo de cozimento proporcionou mudança de coloração nos pós finais obtidos, de forma que os pós de tomate cozido com 20 minutos ficaram com a cor laranja mais forte. Ainda é possível visualizar para a polpa de tomate cru uma evidência da cor vermelho mais forte para os pós com 70% de polpa.

5.9 Avaliação dos resultados de acordo com o planejamento fatorial

Visando-se a otimização do processo de secagem, as variáveis respostas do planejamento experimental foram definidas como os valores do tempo para atingir a umidade desejada de 0,04 em base seca, calculado pelo modelo de Midilli (tMid) e os valores de higroscopicidade dos pós obtidos (H), com os valores designados na Tabela 14.

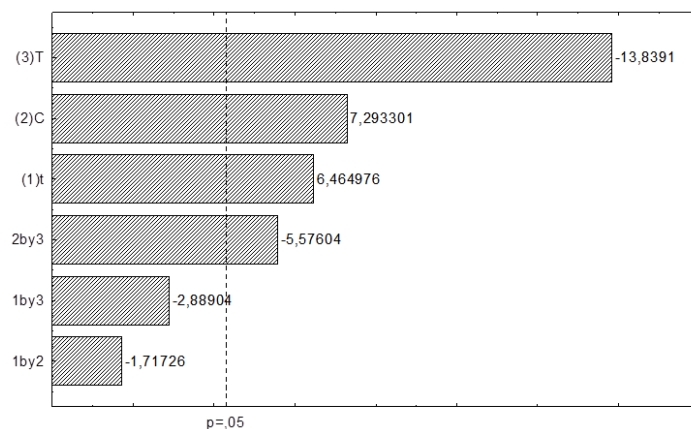
Tabela 14: Variáveis independentes e dependentes.

Exp	Variáveis independentes			Variáveis dependentes	
	Temperatura de secagem (°C)	Tempo de cozimento (minutos)	Concentração de polpa (%)	tMid (minutos)	H (%)
1	60 (-1)	0 (-1)	50 (-1)	51,7	60
2	60 (-1)	0 (-1)	70 (+1)	84,4	90
3	80 (+1)	0 (-1)	50 (-1)	35,0	40
4	80 (+1)	0 (-1)	70 (+1)	46,9	50
5	70 (0)	10 (0)	60 (0)	64,6	70
6	70 (0)	10 (0)	60 (0)	70,1	75
7	70 (0)	10 (0)	60 (0)	63,6	70
8	60 (-1)	20 (+1)	50 (-1)	75,7	90
9	60 (-1)	20 (+1)	70 (+1)	106,7	120
10	80 (+1)	20 (+1)	50 (-1)	51,5	60
11	80 (+1)	20 (+1)	70 (+1)	48,1	50

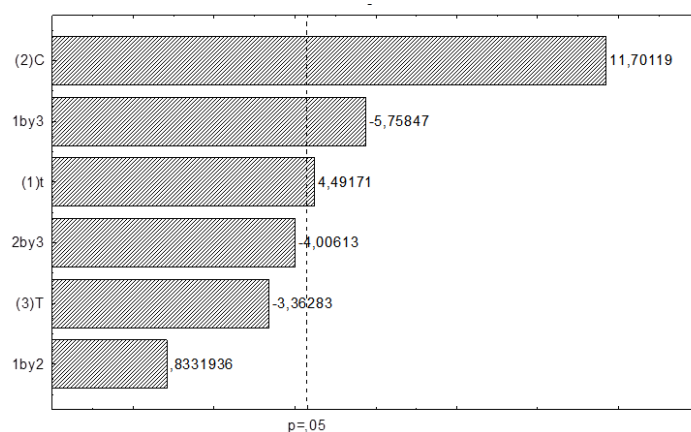
Fonte: Autora (2022).

Os gráficos de Pareto, observados nas Figura 23 foram obtidos para análise do efeito estatístico das variáveis independentes sobre as variáveis resposta (dependentes), com nível de significância de 95% de confiança.

Figura 23: Gráficos de Pareto para as variáveis respostas tempo para atingir a umidade desejada (0,04 em base seca) calculados pelo modelo de Midilli (a) e higroscopicidade dos pós (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2022).

Na Figura 23 (a) tem-se a influência das variáveis independentes sobre o tempo para atingir 0,04g/g de umidade. Observa-se que a variável que mais influenciou foi a temperatura de secagem. O efeito da temperatura é negativo, indicando uma tendência de redução do tempo de secagem com o aumento da temperatura. As variáveis de concentração de polpa e tempo de cozimento também apresentaram influência, mas de maneira positiva, logo, maiores valores dessas variáveis aumentam o tempo para atingir 0,04 de umidade.

Na Figura 23 (b) tem-se a influência das variáveis independentes sobre a higroscopicidade. Observa-se que a variável que mais influenciou foi a concentração de polpa, com influência positiva, indicando a tendência de aumento da higroscopicidade nas maiores concentrações de polpa. Há ainda uma influência discreta do tempo de cozimento no sentido de aumentar a higroscopicidade e provocar um efeito mais

significativo da interação de tempo de cozimento com a temperatura na higroscopicidade, no sentido de diminuir a higroscopicidade.

Foi realizado o cálculo do teste F, para validação da predição dos dados, onde por meio da análise entre o F calculado e F tabelado, é possível verificar se o modelo explica uma quantidade significativa da variação dos dados obtidos pela simulação, com o nível de confiança de 95% (GURGEL, 2014). Os resultados do teste F para as variáveis dependentes encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15: Teste F para as variáveis dependentes.

tempo para atingir 4% de umidade					
Teste F - Regressão			Teste F - Falta de ajuste		
Fcalc	Ftab	Fcalc/Ftab	Fcalc	Ftab	Fcalc/Ftab
35,39	6,16313	5,74	2,10	19	0,110

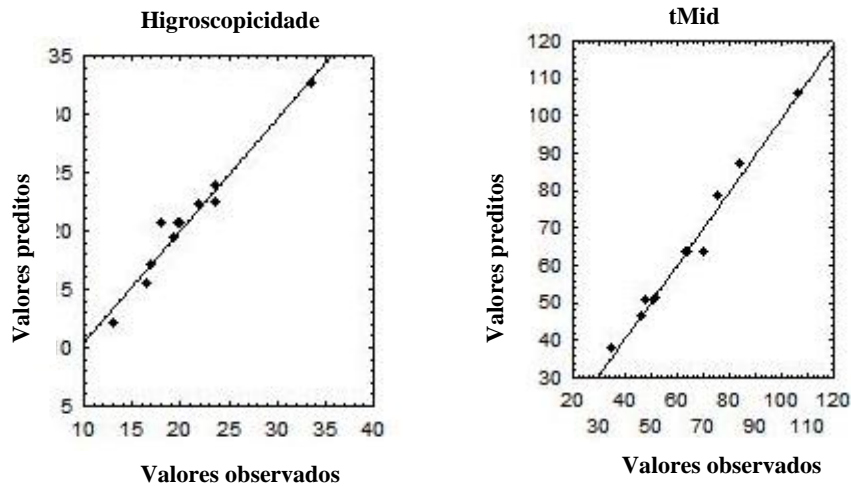
Higroscopicidade					
Teste F - Regressão			Teste F - Falta de ajuste		
Fcalc	Ftab	Fcalc/Ftab	Fcalc	Ftab	Fcalc/Ftab
14,67	6,16313	2,38	3,96	19	0,209

Fonte: Autora (2022).

O teste F – Regressão, indica a significância das respostas, de forma que o valor de Fcalc/Ftab maior que 1 significa que as respostas são significativas. Já o teste F – Falta de ajuste, indica a predição das respostas, de forma que Fcalc/Ftab menor que 1 significa que as respostas são preditivas (ELPÍDIO, 2021). Pelos resultados na Tabela 15, é possível confirmar a significância e predição para as duas variáveis respostas analisadas.

Os gráficos para os valores preditos e observados para ambas as variáveis respostas encontram-se na Figura 24. Por meio deles é possível visualizar a conformidade com os resultados obtidos no teste F, uma vez que os dados observados apresentaram bom ajuste aos dados preditos.

Figura 24: Valores preditos versus observados para as variáveis dependentes.



Fonte: Autora (2022).

Os modelos empíricos finais para as variáveis respostas foram definidos com base nos coeficientes de regressão linear obtidos, levando em consideração os termos que apresentaram significância ($p < 0,05$) conforme apresentado na Figura 24. As Equações 10 e 11 representam os modelos empíricos para tempo de secagem para atingir 0,04 de umidade e higroscopicidade, respectivamente.

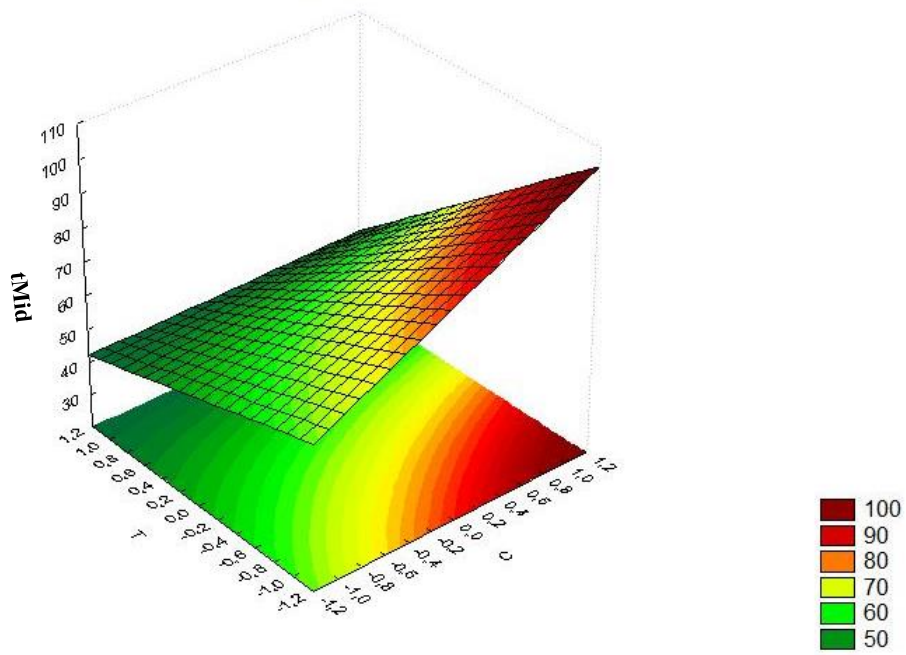
$$tMid = 63,48 + 8 * t + 9,02 * C - 17,12 * T - 6,9 * C * T \quad (10)$$

$$H = 20,63 + 1,78 * t + 4,63 * C - 2,28 * t * T \quad (11)$$

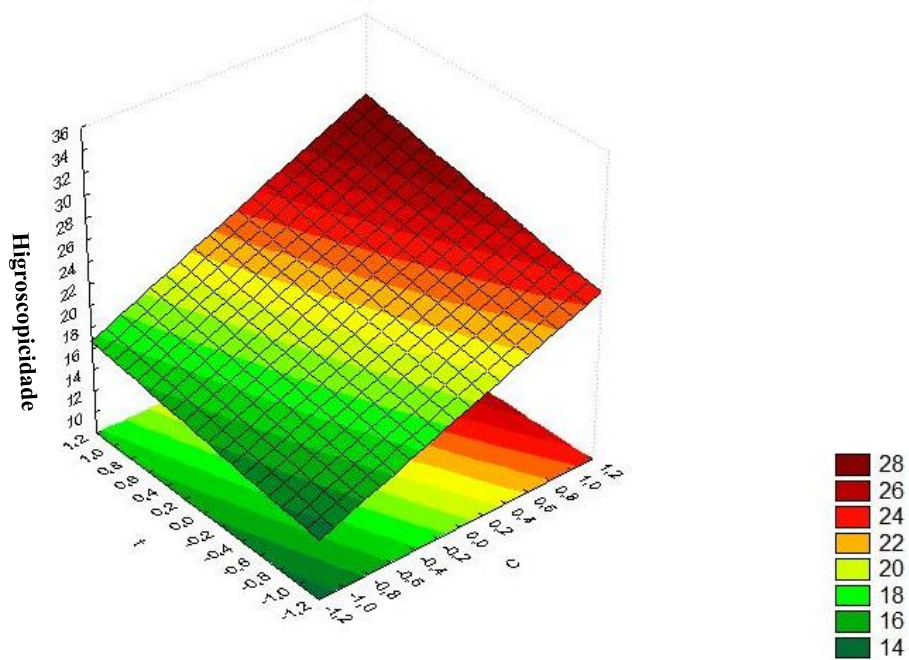
Onde $tMid$ é a tempo para atingir 0,04 em base seca de umidade (min), t é o tempo de secagem (min), C é a concentração de polpa (%), T é a temperatura de secagem ($^{\circ}C$) e H é a higroscopicidade (%).

As superfícies respostas obtidas referentes ao tempo para atingir 0,04 de umidade ($tMid$) e a higroscopicidade (H) encontram-se na Figura 25 (a) e (b), respectivamente. Por meio delas é possível visualizar melhor os resultados discutidos nesse tópico.

Figura 25: Superfícies respostas obtidas para tMid (a) e higroscopicidade (b).



(a)



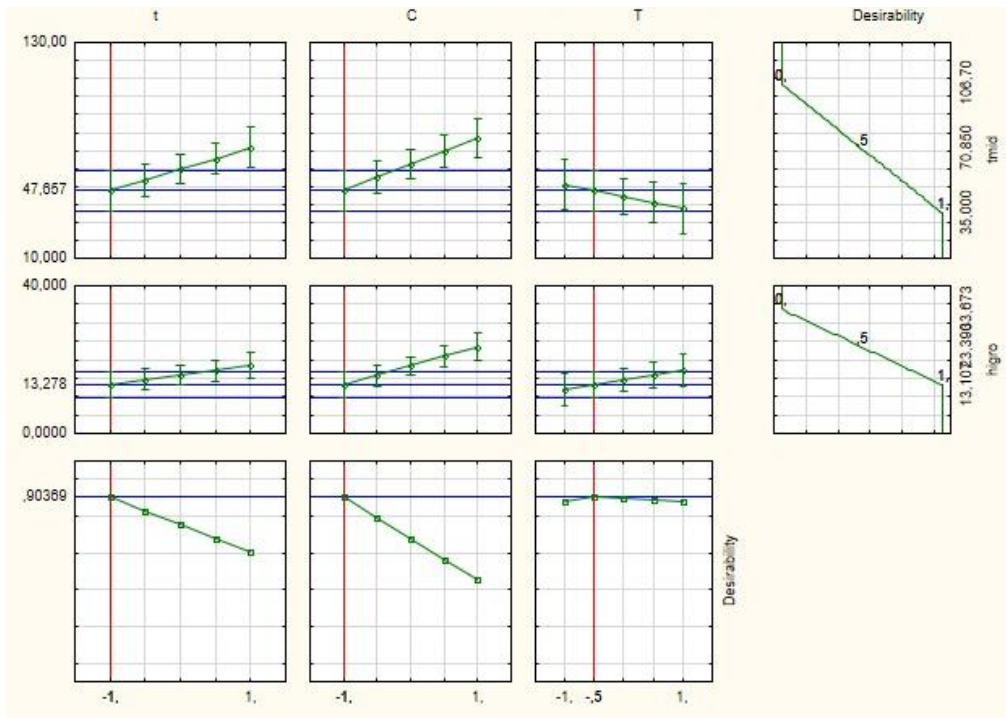
(b)

Fonte: Autora (2022).

5.10 Função de desejabilidade

As desejabilidades individuais e globais foram avaliadas com a finalidade de encontrar uma condição ótima dentre as 11 condições estudadas no presente trabalho, através da análise de variáveis múltiplas com a obtenção de uma resposta comum. Os gráficos para função de desejabilidade com os valores calculados encontram-se na Figura 26. Nessa análise considera-se que a condição ótima, ou desejável será aquela que minimize simultaneamente o tempo de secagem e a higroscopicidade dos pós.

Figura 26: Função de desejabilidade aplicada as variáveis.



Fonte: Autora (2022).

Assim, analisando simultaneamente as variáveis dependentes de tempo para atingir a umidade de 0,04 em base seca (tMid) e higroscopicidade (H), a condição ótima para minimização das variáveis e obtenção dos melhores resultados em uma análise conjunta ocorre na condição de tempo de cozimento 0 minutos (polpa de tomate cru) com 50% de concentração de polpa e temperatura de secagem de 65 °C. Nessa condição se obtém o pó com umidade de 0,04 em base seca e higroscopicidade 13,102% em um tempo de secagem de 35 min. Com essa condição, é possível obter uma desejabilidade global de 0,90369, sendo considerada aceitável e excelente de acordo com a Tabela 3.

Capítulo 7
CONSIDERAÇÕES FINAIS

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos e discutidos, as principais conclusões deste trabalho são:

O processo de coagulação da caseína, embora efetivo, precisa ser melhor otimizado, afim de reduzir o tempo de preparo sem que comprometa o produto final com quantidades altas de coagulante. Ainda, a etapa de separação da caseína também precisa ser otimizada para padronizar melhor a umidade final da caseína pura.

A metodologia desenvolvida para obtenção da espuma de caseína e incorporação da polpa de fruta a mesma com batimento de mais 2 minutos mostrou-se adequada para produção de espumas estáveis, com elevada expansão e porosidade. Ainda, foi possível perceber que as maiores concentrações de polpa e maior tempo de cozimento favorecem a formação de espumas mais densas e menos expandidas.

As curvas que representam a cinética de secagem de todas as espumas evidenciam a ocorrência de dois períodos de secagem, o de taxa constante e o de taxa decrescente. A análise dessas curvas confirma o importante efeito da expansão sobre o tempo de secagem para atingir as condições de equilíbrio.

Foram ajustados modelos matemáticos aos dados experimentais da razão de umidade em função do tempo de secagem. Com exceção do modelo de Fick, que se aplica apenas ao período de taxa decrescente com mecanismo de controle difusional, os demais modelos se ajustaram bem. Realizando-se a análise estatística comparativa dos modelos, tanto pelos valores de R^2 e RQMR quanto pela aplicação do critério de Akaike, o Modelo de Midilli se mostrou o mais adequado para representar a cinética de secagem das espumas. A partir do modelo de Midilli estimou-se o tempo de secagem necessário para as espumas atingirem uma umidade de 0,04 g/g de sólido seco.

Os pós obtidos nos ensaios apresentaram teor de umidade e atividade de água com valores dentro dos padrões para conservação e armazenamento, todavia com características muito higroscópicas.

A análise dos resultados do planejamento experimental para o tempo de secagem para atingir umidade de 0,04 e higroscopicidade levaram a obtenção de modelos preditivos e significativos para ambas as variáveis de acordo com o teste F e avaliação dos gráficos dos valores preditivos versus observados.

A partir da análise da função de desejabilidade aplicada simultaneamente para ambas as variáveis respostas foi encontrado que dentro da faixa de condições analisadas a condição que minimiza ambas as variáveis é tempo de cozimento 0 minutos (polpa crua), concentração de 50% de polpa e temperatura estimada em 65 °C, obtendo-se um pó com 0,04 g/g sólido seco de umidade final e higroscopicidade de 13,102% em um tempo de secagem de 35 minutos.

Sugestões para trabalhos futuros

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do estudo realizado no presente trabalho, foi observado que a etapa de preparação da caseína precisa ser otimizada, com a finalidade de buscar uma caseína menos dispersa no meio, facilitando sua extração, bem como a etapa posterior, de separação da caseína do soro do leite. Uma das opções a serem testadas posteriormente na separação, é a realização da centrifugação da amostra para em seguida realizar a separação. Como a quantidade de soro retirada causa influência de maneira direta na formação, expansão e estabilidade da espuma, a otimização dessa etapa pode ser de grande importância para trabalhos futuros nessa área, pois pode ser responsável pela redução de erros experimentais.

Outro ponto que deve ser observado é o armazenamento dos pós após as secagens, para que os mesmos não absorvam umidade do ambiente externo e não sofram influências que possam modificar os resultados de suas análises-físico químicas. Ainda, é de grande relevância realizar o estudo das isotermas de adsorção para entender melhor o comportamento da higroscopicidade dos pós.

Sugere-se também a produção dos pós em maior escala com base na condição ótima e posteriormente sua caracterização microbiológica, reológica e granulométrica. Outra sugestão é que os pós passem por análises de difração de raio-X e microscopia eletrônica de varredura afim de avaliar melhor as características do material obtido.

Sugere-se utilizar os pós na preparação de produtos alimentícios e aplicar a análise sensorial, visto que o mesmo tem potencial para ser aceito no mercado, uma vez que o tomate é um dos frutos mais consumidos na alimentação, tanto na forma in natura quanto em produtos diversos.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, G. M. Desenvolvimento e avaliação de queijo tipo muçarela nozinho com tomate seco e manjericão desidratado. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Produção Animal da Universidade Brasil, São José dos Campos, São Paulo. 2016.

ARAÚJO, C. DA S., MACEDO, L. L., VIMERCATI, W. C., SARAIVA, S. H., OLIVEIRA, A. DO N., & TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leite de espuma e ajuste de modelos matemáticos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 20(0). 2017. doi:10.1590/1981-6723.15216

ARAÚJO, L. B. Secagem de polpa de goiaba pelo método de camada de espuma. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2019.

BEZ, E. FAION, A. M. STEFFENS, C. STEFFENS, J. Elaboração e Caracterização de Requeijão Cremoso com Adição de Tomate Seco. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.17, n.3, p.235-241, 2015. ISSN:1517-8595.

BRASIL. Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária. Portaria no 553 de 30 de agosto de 1995. Dispõe sobre a Norma de Identidade, Qualidade, Acondicionamento e Embalagem do Tomate in natura, para fins de comercialização e Revoga as especificações de Identidade, Qualidade, Acondicionamento e Embalagem do Tomate, estabelecidas pela Portaria no. 76, de 25 de fevereiro de 1975. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, set, 1995.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria SARC no 085 de 06 de março de 2002. Propõe o Regulamento técnico de identidade e qualidade para classificação do tomate. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, mar, 2002

BRASIL, R. B.; NICOLAU, E. S.; CABRAL, J. F.; SILVA, M. A. P. da. Estrutura e estabilidade das micelas de caseína do leite bovino. *Ciência Animal* 25 (2): 71-80. 2015.

CAMARGO, G. A.; NIURK, H.; QUEIROZ, M. R. Avaliação da Qualidade de Tomate Seco em Conserva. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.5, p. 521-526, 2007.

CASTOLDI, M. Estudo do processo de secagem de polpa de tomate por refractance window®. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

CHEGINI, G.; GHOBADIAN, B. Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. *Drying Technology*, v. 23, p. 657 - 668. DOI:10.1081/DRT200054161. 2005.

COELHO, B. E. S.; TORRES, G. S.; NETO, A. F. COELHO, C. L. estudo da estabilidade da espuma da polpa de acerola para secagem pelo método foam-mat drying. *Revista Craibeiras de Agroecologia*, v. 4, n. 1, p. e7685. 2019.

COELHO, K. D. Secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em camada delgada: avaliação das características físico-químicas. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia E Ciências De Alimentos. Dissertação apresentada para obtenção de Título de Mestre em Engenharia e Ciências de Alimentos. Rio Grande, RS. 2010.

CONHEÇA OS DIFERENTES PONTOS DE COLHEITA DE TOMATES. Canal do Horticultor, 2021. Disponível em: <https://canaldohorticultor.com.br/ponto-de-colheita-de-tomates/#:~:text=Rosado%3A%20Fruto%20com%20aproximadamente%2030,90%25%20da%20superf%C3%ADcie%20do%20fruto>. Acesso em: 08 de julho de 2022.

CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press. 1975.

DALGLEISH, D. G.; SPAGNUOLO, P. A.; GOFF, H. D. A possible structure of the casein micelle based on high-resolution field-emission scanning electron microscopy. *International Dairy Journal*. v. 14, n.12, p. 1025-1031, 2004.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. *Química de Alimentos de Fennema*. Tradução da 4ª ed. Artmed. 2010.

DANTAS, S.C.M. Desidratação de polpas de frutas pelo método *foam-mat*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Natal, RN. 2010.

DELMIRO, T. M. Secagem da cenoura (*Daucus carota* L.) pelo método *foam-mat*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2016.

DIAMANTE, L. M.; MUNRO, P. A. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, v. 51, n. 4, p.271-276, 1993.

DICKINSON, E.; Structure formation in casein-based gels, foams, and emulsions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. v. 288, n. 1-3, pg. 3-11, 2006.

ELPÍDIO, C. M. de A. Secagem da ameixa pelo método de camada de espuma: otimização dos parâmetros e caracterização do produto. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal, RN. 2021.

FERNANDES, R. V. de B.; QUEIROZ, F.; BOTREL, D. A.; ROCHA, V. V.; LIMA, C. F. de; SOUZA, V. R. de. SECAGEM DE POLPA DE TOMATE PELO MÉTODO DE CAMADA DE ESPUMA. *Biosci. J.,Uberlândia*, v. 29, n. 4, pág. 816-825, julho/agosto. 2013.

FERNANDES, R. V. de B.; QUEIROZ, F.; BOTREL, D. A.; ROCHA, V. V.; LIMA, C. F. de; SOUZA, V. R. de. Estudo da adição de albumina e da temperatura de secagem nas características de polpa de tomate em pó. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 35, n. 3, p. 1267-1278, maio/jun. 2014. DOI: 10.5433/1679-0359.2014v35n3p1267.

FERREIRA, S. M. R.; FREITAS, R. J. S. de; LAZZARI, E. N. Padrão de identidade e qualidade do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) de mesa. *Ciência Rural*, v. 34, p. 329–335, fevereiro. 2004. DOI:10.1590/s0103-84782004000100054.

FLORIANO, E. P.; MÜLLER, I.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Ajuste e seleção de modelos tradicionais para série temporal de dados de altura de árvores. *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 16, n. 2, p. 177-199. 2006. ISSN 0103-9954.

FRANCO, T. S. Desidratação do suco de yacon pelo método de camada de espuma. 2015. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

FRANCO, T.; PERUSSELLO, C.; ELLENDERSEN, L.; MASSON, M. Effect of process parameters on *foam-mat* drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and thin-layer drying modelling of experimental data. *Journal of Food Process Engineering*, v. 40, p. 1-10. 2015. DOI:10.1111/jfpe.12264.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das operações unitárias. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 670 p. 1982.

FOX, P. F.; UNIACKE-LOWE, T.; MCSWEENEY, P. L. H.; & O'MAHONY, J. A. *Dairy Chemistry and Biochemistry*. 2015. DOI:10.1007/978-3-319-14892-2.

GAVA, A. J. Princípios de tecnologia de alimentos. São Paulo: Nobel, 200p. 2000.

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

GUIMARÃES, M. K. A.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. D.; & QUEIROZ, A. J. D. M. FOAM-MAT DRYING KINETICS OF KEITT MANGO PULP. *Revista Caatinga*, 30(1), 172–180. 2017. DOI:10.1590/1983-21252017v30n119rc.

GURGEL, C. E. M. R. Secagem da polpa de graviola (*Annona muricata* L.) em camada de espuma - desempenho do processo e características do produto. 80 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2014.

GURGEL, C. E. M. R. Produção de pó de banana verde e madura através da secagem em camada de espuma – otimização das condições de processo e avaliação do produto. 120 f. Tese (doutorado) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia química, Programa de pós-graduação em Engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2019.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v.1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3.ed. São Paulo: IMESP, 1985.

JUNIOR, F. P. de B. Produção de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) reutilizando substratos sob cultivo protegido no município de Iranduba-AM. Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.

KADAM, D. M., RAI, D. R., PATIL, R. T., WILSON, R. A., KAUR, S., & KUMAR, R. Quality of fresh and stored foam mat dried Mandarin powder. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(4), 793–799. 2011. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02559.x

LEWIS, W. K. The rate of drying solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LOBO, F. A. T. F. Desidratação de polpa de manga da variedade Tommy Atkins por drying, visando à retenção de compostos bioativos e à formulação de alimentos com apelo de funcionais. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Ciências Aplicadas a Produtos para Saúde da Faculdade de Farmácia da Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2017.

MACHADO, V. G. Obtenção de tomate em pó por atomização: influência das variáveis de processo na qualidade do produto. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação - Curso de Engenharia de Alimentos, Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MARTINS, F. P.; NETO, J. C. B.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, A. M. de O. Secagem: Uma revisão. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC*, Vol. 06 N. 04. 2020.

MATOS, R. Q.; MACÍAS, M. A. C.; SILVESTRE, E. H. L. Qualidade física e físico-química do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) variedade chico e cachilende produzidos em Huambo. *Revista Cubana de Química*, vol.32, n.3. Santiago de Cuba sept.-dic. 2020.

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

MARQUES, G. M. R. Secagem de caldo de cana em leito de espuma e avaliação sensorial do produto. 84p. Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração em Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga. 2009.

MOTULSKY, H.; CHRISTOPOULOS, A. Fitting models to biological data using linear e nonlinear regression: a practical guide to curve fitting. San Diego: GraphPad Software. 351p. 2003.

MYUNG, I. J.; PITT, M. A.; KIM, W. Model evaluation, testing and selection. Columbus: Ohio State University, Department of Psychology. 2003. 45p.

NICOLINI, K. G.; GALLI, D. C.; RODRIGUES, R. da S. Desidratação osmótica em tomates: uma revisão. 6º Simpósio de Segurança Alimentar. Desvendando mitos. FAURGS, Gramado, RS. 2018.

NÓBREGA, E. M. M. A. Secagem do resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.): estudo do processo e avaliação do impacto sobre o produto final. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2012.

NOVAES, C. G.; YAMAKI, R. T.; DE PAULA, V. F.; DO NASCIMENTO JÚNIOR, B. B.; BARRETO, J. A.; VALASQUES, G. S.; BEZERRA, M. A. Otimização de Métodos Analíticos Usando Metodologia de Superfícies De Resposta - Parte I: Variáveis de Processo. Revista Virtual de Química, v. 9 (no. 3), 1184-1215. 2017.

OLIVEIRA, A. G. P. de. Secagem da polpa de coco verde pelo método de camada de espuma. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2019.

OLIVEIRA, D. M., CLEMENTE, E., & DA COSTA, J. M. C. Hygroscopic behavior and degree of caking of grugru palm (*Acrocomia aculeata*) powder. Journal of Food Science and Technology, 51(10), 2783–2789. 2012. DOI:10.1007/s13197-012-0814-9

O'CONNELL, J. E.; SARACINO, P.; HUPPERTZ, T.; UNIAKE, T.; KRUIF C. G. de; KELLY, A. L. FOX, P. F. Influence of ethanol on the rennet- induced coagulation of milk. *Journal of Dairy Research*, v. 73. 2006. DOI: 10.1017/S0022029906001737.

PAGE, G. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. MSc Thesis. Purdue University, Indiana, USA. 1949.

PAIVA, E. M. de O. Estudo da produção do pó de beterraba por secagem para posterior aplicação em cosméticos. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2020.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. Seleção de processos e equipamentos de secagem. CONBEA, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

PAULA, H.M. & FERNANDES, C.E. Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos. *Eng Sanit Ambient*, v. 23, no. 5. 2018. doi: 10.1590/S1413-41522018169155.

PEREIRA, I. E.; QUEIROZ, A. J. de M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. de. Características físico-químicas do tomate em pó durante o armazenamento. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.6, n.1. 2006.

PHADUNGATH, C. Casein micelle structure: a concise review. *Songklanakarin Journal Science Technology*, v. 27, p. 201-212, 2005.

PEGADO, W. R. de Q. Obtenção da farinha de batata-doce (*Ipomoea batatas*) pelo processo. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2016.

PINTO, E. G. Caracterização da espuma de jenipapo (*Genipa americana* L.) com diferentes aditivos visando à secagem em leito de espuma. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Itapetinga-BA, 2009.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. V. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type *foam-mat* dryer. *Journal of Food Engineering*, v.79, p.1452-1459, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.027>.

RAHARITSIFA, N.; GENOVESE, D. B.; RATTI, C. Characterization of apple juice foams for *foam-mat* drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of food science*, v. 71, p. 142-151. 2006. doi:10.1111/j.1365-2621.2006.tb15627.x.

RATTI, C.; KUDRA, T. Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technology*, v. 24, n.9, p. 1101-1108, 2006.

REIS, C. G. dos. Cinética de secagem de manga ‘princesa’ pelo método camada de espuma (*foam-mat* drying): experimentação e modelagem matemática. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia de Alimentos no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, Salgueiro. 2019.

RIBARDO, C.; ALLEN, T.T. An Alternative Desirability Function for Achieving “Six Sigma” Quality. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 19, n. 3, p. 227-240. 2003. doi: <https://doi.org/10.1002/qre.523>.

ROMAN, J. A. Propriedades físico-químicas, nutritivas e funcionais da caseína de leite bovino obtida por diferentes processos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Departamento de Planejamento Alimentar e Nutrição, Campinas. 2002.

ROMAN, J. A.; SGARBIERI, V. C. Obtenção e caracterização química e nutricional de diferentes concentrados de caseína. *Revista de Nutrição*, 18(1), 75–83. 2005.

SANTOS, A. B. F. M. dos. SECAGEM DE POLPA DE JABUTICABA, SIRIGUELA E UMBU EM CAMADA DE ESPUMA UTILIZANDO A CASEÍNA COMO EMULSIFICANTE. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Bacharelado em engenharia química, Natal. 2022.

SANTOS, N. C., ALMEIDA, R. L. J., DE MEDEIROS, M. F. D., HOSKIN, R. T., & PEDRINI, M. R. S. Foaming characteristics and impact of ethanol pretreatment in drying

behavior and physical characteristics for avocado pulp powder obtained by foam mat drying. *Journal of Food Science*, 1–16. 2022. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16123>

SAUTER, E.; MONTOURE, J. The relationship of lysozyme content of egg White to volume and stability of foams. *Journal of Food Science*, v. 37, p. 918-920. DOI:10.1111/j.1365-2621.1972.tb03703.x. 1972.

SGARBIERI, V. C. *Proteínas em alimentos protéicos: propriedades, degradações, modificações*. São Paulo: Varela, 517 p. 1996.

SILVA, A. S., GURJÃO, K. C. DE O., ALMEIDA, F. DE A. C., BRUNO, R. DE L. A., & PEREIRA, W. E. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(6), 1899–1905. 2008. doi:10.1590/s1413-70542008000600032

SILVA, F. L. da; OLIVEIRA, M B. de; MAURICIO, E. F.; GOMES, E. R.; PERRONE, I. T. CARVALHO, A. F. de; STEPHANI, R. Monitoramento da distribuição do tamanho das partículas do leite integral e desnatado durante os processos de coagulação ácida ou enzimática. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, e7011124438. 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24438>.

SILVA, J. da; PEREIRA, V. de S.; MEDEIROS, M. L. da S.; SILVA, A. F. V. da; MARTINS, G. M. V. Moldagem cinética da secagem da polpa de caqui (*diospyros kaki* l.) em camada de espuma/ foam mat drying kinetic modeling of persimmon (*diospyros kaki* l.) Pulp. *Brazilian Journal of Development*, V. 7, no. 7. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n7-564>.

SOUZA, V. C. Efeito da liofilização e desidratação em leite de espuma sobre a qualidade do pó de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). 48 Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga. 2011.

SOUZA, T. L. de; PAULA, A. C. C. F. F. de; LEITE, P. da C.; MALUF, G. E. G. M.; OLIVEIRA, T. F. B. de. Efeito da intensidade luminosa de forma complementar noturna no crescimento de mudas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum*). IV Semana de Ciência e Tecnologia do IFMG campus Bambuí. 2011.

TACO (Tabela Brasileira de Composição de Alimentos). NEPA-UNICAMP. 4ª edição revisada e ampliada. Campinas, SP: NEPA-UNICAMP, 2011. Disponível em: https://www.nepa.unicamp.br/taco/contar/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf?arquivo=1. Acesso em: 18 de janeiro de 2022.

TALAMANI, L. Espumas estruturadas da caseína: otimização do processo de produção e caracterização físico-química. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Prog de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos. Florianópolis. 2018.

TRENTO, D. A.; ANTUNES, D. T. JÚNIOR, F. F. ZANUZO, M. R.; DALLACORT, R. JÚNIOR, S. S. Desempenho de cultivares de tomate italiano de crescimento determinado em cultivo protegido sob altas temperaturas. *Nativa*, Sinop, v. 9, n. 4, p. 359-366, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i4.10945>.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, v. 19, p. 583-597. 2001. DOI:10.1081/DRT-100103936.

YE, A. Functional properties of milk protein concentrates: Emulsifying properties, adsorption and stability of emulsions. *International Dairy Journal*, v. 21, p. 14–20, 2011.

ZANOELO, E. F.; DI CELSO, G. M.; KASKANTZIS, G. Drying Kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. *Biosystems Engineering*, 96(4), 487–494. 2007. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.12.006.

ZHU, H. and S. DAMODARAN. Proteose peptones and physical factors affect foaming properties of whey protein isolate. *J. Food Sci.* 59:554–560. 1994.