



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

Maisa Dias Cavalcante

**Secagem em leito de espuma da polpa de acerola com agentes espumantes
veganos: avaliação do processo e de seus efeitos sobre a qualidade dos pós e
a estabilidade no armazenamento**

São José do Rio Preto
2023

Maisa Dias Cavalcante

**Secagem em leito de espuma da polpa de acerola com agentes espumantes
veganos: avaliação do processo e de seus efeitos sobre a qualidade dos pós e
a estabilidade no armazenamento**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Maria Aparecida Mauro

São José do Rio Preto
2023

C376s

Cavalcante, Maisa Dias

Secagem em leito de espuma da polpa de acerola com agentes espumantes veganos: avaliação do processo e de seus efeitos sobre a qualidade dos pós e a estabilidade no armazenamento / Maisa Dias Cavalcante. -- São José do Rio Preto, 2023 150

p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto
Orientadora: Maria Aparecida Mauro

1. Compostos bioativos. 2. Isolado da proteína de soja. 3. Concentrado da proteína de ervilha. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Maisa Dias Cavalcante

**Secagem em leito de espuma da polpa de acerola com agentes espumantes
veganos: avaliação do processo e de seus efeitos sobre a qualidade dos pós e
a estabilidade no armazenamento**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Comissão Examinadora

Prof^ª. Dr^ª. Maria Aparecida Mauro
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Vânia Regina Nicoletti
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

Prof^ª. Dr^ª. Ana María Chaux Gutiérrez
Universidade Católica Luis Amigó - Colômbia

Prof. Dr. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Instituto Federal Goiano - Campus Iporá

São José do Rio Preto
30 de agosto de 2023

Aos meus pais, Manoel Jorge e Maria Isabel,
Meu irmão Thomas Jefferson e ao meu esposo Renivon Jr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me iluminar e guiar os meus passos por planos maiores do que eu possa imaginar!

Ao meu esposo Renivon Junior, por sempre estar ao meu lado, sendo meu motor e porto seguro. Agradeço por estar ao meu lado, compreender os momentos de ausência e sempre estar disposto a ouvir minhas ideias e pensamentos. Seu amor, apoio incondicional e encorajamento foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À minha família, principalmente aos meus queridos pais, Manoel Jorge e Maria Isabel, gostaria de expressar minha eterna gratidão por todo o apoio, amor e incentivo que me deram ao longo desta jornada acadêmica. Vocês sempre foram meu exemplo de dedicação aos estudos e sempre me mostraram a importância do conhecimento para o crescimento pessoal e profissional. Mesmo com a distância, sei que posso contar com o apoio incondicional de vocês, e isso foi fundamental para que eu pudesse seguir em frente com determinação e foco.

Ao meu irmão Thomas Jefferson, desde a nossa infância, dividimos todos os momentos da vida. Sua presença e companhia têm sido essenciais em todos os desafios que enfrentamos juntos. Obrigado por estar sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando em todas as fases dessa caminhada.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro, gostaria de expressar minha profunda gratidão por toda orientação, paciência, disponibilidade e capacidade de inspirar um alto padrão de excelência. Com seu jeitinho cativante, desperta ainda mais a minha curiosidade pelo mundo da pesquisa, estimulando a compreensão do que está por trás das coisas. Sou imensamente grata por ter tido a oportunidade de aprender com você e por toda a confiança que depositou em mim ao longo deste processo. Seu apoio foi inestimável, e serei eternamente grata por ter tido a honra de ser orientada por alguém tão talentosa e dedicada.

Às meninas, Ana Filippin, Lais, Mariana Garcia, Maria Fernanda, Daiane Bortolote e a Mariana Leite gostaria de expressar minha sincera gratidão por toda ajuda, companheirismo e risadas ao longo dessa jornada de pesquisa. Vocês tornaram cada dia de trabalho mais leve e prazeroso, e não tenho palavras suficientes para descrever a quão valiosa foi a colaboração de vocês nessa trajetória. Um agradecimento especial ao Maicon Nery que auxiliou na execução de algumas etapas da tese.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Natália Soares Janzanti e ao Prof. Dr. João Cláudio Thoméo pelas correções da qualificação.

Aos professores membros da banca examinadora, gostaria de expressar minha profunda gratidão por aceitarem o convite para avaliar minha tese e pelas correções e contribuições que forneceram ao longo desse processo.

A todos os professores, técnicos e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos.

À DuPont – Danisco Brasil Ltda, pela doação do Dimodan[®] e Lactem.

À empresa Ecil Trading (Empreendimento Comercial e Industrial Ecil Ltda), pela doação do concentrado de proteína de ervilha.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à qual agradeço.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro à pesquisa, por meio do projeto de pesquisa de que participo (Processo nº 2020/05254-4).

E a todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional, meu MUITO OBRIGADA!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá, citado por Robson Pinheiro, no livro ‘A força eterna do amor’, 2009, p.126)

RESUMO

A acerola é uma fruta altamente perecível, reconhecida por sua riqueza em compostos bioativos, principalmente a vitamina C, sendo que demanda processamentos para sua conservação e preservação. A secagem em leito de espuma é uma alternativa simples e de baixo custo para obtenção de alimentos em pó através da desidratação de espumas formadas pela adição de agentes espumantes e estabilizantes. Proteínas vegetais são frequentemente utilizadas para auxiliar na incorporação de ar e proporcionar estabilidade a espumas, sendo consideradas mais sustentáveis que as de origem animal e adequadas para atender às crescentes demandas de consumidores vegetarianos e veganos, ou que buscam uma alimentação mais consciente e saudável. O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos da temperatura (60 e 70 °C) e da aplicação de diferentes agentes espumantes de origem vegetal sobre a cinética de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, a qualidade física e nutricional dos pós e sua estabilidade durante o armazenamento. Os agentes espumantes foram proteína de soja (SPI), proteína de ervilha (CPP), monoglicerídeos destilados (D) e éster de ácido láctico de mono e diglicerídeos (L). Com a finalidade de avaliar o efeito do processo sobre a qualidade e o valor nutricional dos produtos desidratados, foi determinada a retenção de compostos bioativos (vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos) e a variação da cor dos pós de acerola. Os pós também foram caracterizados através de análises físico-químicas, morfológicas e nutricionais. Além disso, foi realizado um estudo de armazenamento dos pós por um período de 60 dias, para avaliar a estabilidade e a retenção dos compostos bioativos ao longo do tempo. Os resultados evidenciaram que, durante o processo de secagem, houve boa retenção de nutrientes, e que os pós apresentaram características físicas adequadas. As formulações com apenas SPI e com SPI, L e D, quando desidratadas a 70 °C, destacaram-se como opções promissoras para a produção de pós de acerola com alta qualidade nutricional, apresentando significativa retenção de compostos bioativos, notadamente de vitamina C, acima de 90%. Em geral, os teores de vitamina C nos pós desidratados foram altos, superiores a 10 g de vitamina por 100 g de sólidos secos. Os pós obtidos apresentaram umidade e atividade de água adequadas para o armazenamento. A avaliação do armazenamento acelerado, com base na meia vida da vitamina C, resultou em aproximadamente 6 meses de vida útil dos produtos. Entretanto, a variação de umidade observada enfatiza a importância da escolha de embalagens com permeabilidade adequada, para garantir a estabilidade e a segurança dos pós de acerola durante o armazenamento. Os resultados também ressaltam a relevância do controle da temperatura de armazenamento para preservar a qualidade dos produtos ao longo do tempo, devido à alta

energia de ativação associada à degradação da vitamina C. Conclui-se que a secagem em leito de espuma de polpa de acerola é um processo simples que proporciona produtos em pó com elevado conteúdo nutricional, e que, com embalagem e armazenamento apropriados, sua qualidade pode ser preservada durante alguns meses, o que é crucial para viabilizar a comercialização desses produtos.

Palavras-chave: *Malpighia emarginata*. Isolado de proteína de soja. Concentrado de proteína de ervilha. Vitamina C. Compostos bioativos.

ABSTRACT

Acerola is a highly perishable fruit, recognized for its richness in bioactive compounds, mainly vitamin C, and requires processing for its preservation and conservation. Foam-mat drying is a simple and low-cost alternative for obtaining powdered foods by dehydrating foams formed by the addition of foaming and stabilizing agents. Plant-based proteins are often used as such agents, providing foam stability and air incorporation into the foam, being considered more sustainable than those of animal origin to meet the growing demands of vegetarian and vegan consumers, or those seeking a more conscious and healthy diet. The aim of this study was to investigate the effects of temperature (60 and 70 °C) and the application of different plant-based foaming agents on the kinetics of foam-mat drying process of acerola pulp, the physical and nutritional quality of the powders and their stability during storage. The foaming agents were soy protein isolate (SPI), pea protein concentrate (CPP), distilled monoglycerides (D) lactic acid esters of mono- and diglycerides (L). In order to evaluate the effect of the process on the quality and nutritional value of the dehydrated products, the retention of bioactive compounds (vitamin C, carotenoids and total phenolic compounds) and the variation in the color of the acerola powders were determined. The powders were also characterized through physical-chemical, morphological and nutritional analyses. In addition, a storage study of the powders was carried out for a period of 60 days, aiming to determine the stability and retention of the bioactive compounds over time. The results of this study showed good retention of nutrients during foam-mat drying of acerola pulp with the different foaming agents, and suitable physical characteristics for the powders. Formulations with only SPI and with SPI, L and D, when dehydrated at 70 °C, stood out as promising options for the production of acerola powders with high nutritional quality, showing significant retention of bioactive compounds, notably vitamin C, above 90%. In general, the levels of vitamin C in the dehydrated powders were high, greater than 10 g of vitamin per 100 g of dry solids. The powders obtained showed adequate moisture and water activity for storage. The accelerated storage evaluation, based on the half-life of vitamin C, resulted in approximately 6 months of shelf-life. However, the observed variation in moisture highlighted the importance of choosing packaging with suitable permeability to ensure the stability and safety of acerola powders during storage. The results also highlighted the relevance of adequate control of storage temperature to preserve the quality of the products over time, due to the high activation energy associated with the degradation of vitamin C. It is concluded that acerola pulp foam-mat drying is a simple process that provides powdered

products with high nutritional content, and that, with appropriate packaging and storage, its quality can be preserved for a few months, which is crucial to enable the commercialization of these products.

Keywords: *Malpighia emarginata*. Soy protein isolate. Pea protein concentrate. Vitamin C. Bioactive compounds.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Diagrama representacional da estrutura da espuma	21
Figura 2.2 – Cinética de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de difusão (Eq.2.1), nas temperaturas de 60 °C (a) e 70 °C (b)	52
Figura 2.3 – Taxa de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de difusão (Eq.2.1), em função do conteúdo de água, em base seca, nas temperaturas de 60 °C (a) e 70 °C (b)	54
Figura 2.4 – Cinética de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de Page (Equação 2.4), nas temperaturas de 60°C (a) e 70 °C (b)	60
Figura 2.5 – Conteúdo de vitamina C da polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura, em base seca (a) e retenção de vitamina C durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C)	61
Figura 2.6 – Conteúdo de carotenoides da polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura, em base seca (a) e retenção de carotenoides durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C) (b)	64
Figura 2.7 – Conteúdo de CFT de polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura, em base seca (a) e retenção de CFT durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C)	66
Figura 2.8 – Comparação de parâmetros de cor entre a polpa de acerola pura e os pós obtidos por secagem em leito de espuma a 60 °C e 70 °C	68
Figura 3.1 – Espectro de raio X dos aditivos em pó sendo SPI (a), CPP (b), Lactem (c) e Dimodan® (d)	89
Figura 3.2 – Espectro de raio-X dos pós de acerola produzidos com diferentes agentes espumantes submetidos a condições de secagem a 60 °C (a) e 70 °C (b)	90
Figura 3.3 – Micrografias MEV do pó de polpa pura liofilizado (a, b, c) e dos pós obtidos por secagem em leito de espuma a 60 e 70 °C: 1%SPI (d, e, f), 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI (g, h, i), 0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP (j, k, l) e 0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP	93
Figura 3.4 – Comparação entre umidade de equilíbrio experimental e calculada de acordo com o modelo de GAB (Equação 3.3) para pós de polpa de acerola obtidos com diferentes agentes espumantes em secagem a 70 °C e polpa pura liofilizada (controle)	98

Figura 3.5 – Parâmetros de cor dos pós reconstituídos obtidos por diferentes formulações, incluindo a liofilização e a secagem em leito de espuma, utilizando temperaturas de 60 °C e 70 °C	99
Figura 4.1 – Modelo de cinética de reação de segunda ordem para o conteúdo de vitamina C (mg/100g de matéria seca) (a) e a retenção de vitamina C (%) (b) de pós de acerola durante o armazenamento, em diferentes temperaturas	115
Figura 4.2 – Efeito da temperatura de armazenamento sobre a contante da degradação da vitamina C em pós de polpa de acerola durante o armazenamento	117
Figura 4.3 – Modelo de cinética de reação de segunda ordem para o conteúdo CFT (mg EAG/100g de matéria seca) (a) e a retenção de CFT (%) (b) de pós de acerola durante o armazenamento, em diferentes temperaturas	118
Figura 4.4 – Efeito da temperatura de armazenamento sobre a contante da degradação dos CFT em pós de polpa de acerola durante o armazenamento	120
Figura 4.5 – Modelo de cinética de reação de ordem zero para a variação dos parâmetros da cor dos pós de acerola durante o armazenamento em diferentes temperaturas: (a) claridade (L^*); (b) diferença total de cor (ΔE)	122
Figura 4.6 – Modelo de cinética de ordem zero para a variação de (a) atividade de água e (b) umidade dos pós de acerola (g água/100 g pó de acerola) durante o armazenamento em diferentes temperaturas	125
Figura 4.7 – Aparência dos pós de acerola durante o armazenamento nas diferentes temperaturas, formulados com: (a) 1%SPI e (b) 0,07%D + 0,15% L e 0,5%SPI	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 0.1 – O efeito do agente espumante/estabilizador, das condições de formação de espuma e do processo de secagem nas propriedades do pó de frutas e vegetais secos através da secagem em leito de espuma	28
Tabela 2.1 – Formulações de cada tratamento e composição das espumas	45
Tabela 2.2 – Modelos matemáticos empíricos aplicados à cinética de secagem em camada de espuma da polpa de acerola	47
Tabela 2.3 – Média e desvio-padrão (DP) de parâmetros físicos e químicos determinados na polpa de acerola	51
Tabela 2.4 – Características da espuma da polpa de acerola com diferentes agentes espumantes	54
Tabela 2.5 – Coeficientes de difusão efetiva de água determinados em secagem em leito de espuma de polpa de acerola (Equação (2.1)) atividade de água e teor de água ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ amostra), antes e após a secagem	56
Tabela 2.6 – Parâmetros de ajuste dos diferentes modelos de secagem em camada fina para secagem em leito de espuma de polpa de acerola	58
Tabela 3.1 – Atividade de água de soluções salinas saturadas, a 30 °C	83
Tabela 3.2 – Valores médios de umidade ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ pó), solubilidade (%) e molhabilidade (s) dos pós de acerola para diferentes tratamentos	86
Tabela 3.3 – Cristalinidade relativa das matérias-primas e dos pós de acerola	91
Tabela 3.4 – Valores estimados dos parâmetros de coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio porcentual (%P) e qui-quadrado (χ^2) para os diferentes modelos de sorção aplicados aos dados experimentais dos pós de acerola obtidos por secagem a 70 °C	95
Tabela 4.1 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na meia vida da vitamina C	117
Tabela 4.2 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na meia vida dos CFT	120
Tabela 4.3 – Atividade de água dos pós de acerola em diferentes temperaturas durante o armazenamento	124
Tabela 4.4 – Umidade ($\text{g} \text{ água}/100 \text{ g pó de acerola}$) dos pós de acerola em diferentes temperaturas durante o armazenamento	124

Tabela 4.5 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na umidade 126

Tabela A.1 – Conteúdo de vitamina C (mg de vitamina C/ 100g de matéria seca) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas durante 60 dias 136

Tabela A.2 – Conteúdo de compostos fenólicos totais (mg EAG/100g de matéria seca) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas durante 60 dias 136

Tabela A.3 – Parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , C^* , h e ΔE) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas 5, 25 e 35 °C durante 60 dias de armazenamento 138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH₃CO₂K	Acetato de potássio
CMC	Carboximetilcelulose
CFT	Compostos fenólicos totais
CPP	Concentrado de proteína de ervilha
D	Dimodan [®]
GA	Goma arábica
GMS	Monoestearato de glicerol
K₂CO₃	Carbonato de potássio
SPI	Isolado da proteína de soja
L	Lactem
LiCl	Cloreto de lítio
LS	Lecitina de soja
MD	Maltodextrina
MgCl₂	Cloreto de magnésio
MC	Metilcelulose
NaBr	Brometo de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaNO₂	Nitrito de sódio
PPI	Isolado de Proteína de Ervilha
PS	Proteína de Soja
Ret	Retenção

LISTA DE SÍMBOLOS

L*	Claridade, coordenada para a determinação da claridade da amostra, do escuro (0) ao claro (100)
a*	Coordenada retangular para a determinação da cor verde (-a*) ao vermelho (+a*)
b*	Coordenada retangular para a determinação da cor amarelo (+b*) ao azul (-b*)
C*	Cromaticidade, coordenada polar para a determinação da intensidade da coloração
h	Ângulo Hue, coordenada polar para a determinação da tendência de coloração da amostra sendo a cor vermelha caracterizada como 0°, amarela 90°, verde 180° e azul 270
ΔE	Diferença total de cor
a_w	Atividade de água [adimensional]
<i>D_{eff}</i>	Difusividade efetiva [m ² /s]
R	Constante dos gases ideais (8,314 J·K ⁻¹ ·mol ⁻¹).
R²	Coefficiente de determinação
E_a	Energia de ativação [kJ/mol]
k	Constante de velocidade de reação

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
Objetivo Geral	15
Objetivos Específicos	15
1– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
1.1 ACEROLA	17
1.2 SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA	18
1.3 ADITIVOS	23
1.4 ESTADO DA ARTE EM SECAGEM EM LEITO DE ESPUMAS ELABORADAS COM INGREDIENTES DE ORIGEM VEGETAL.....	27
REFERÊNCIAS.....	33
2 – AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE AGENTES ESPUMANTES VEGETAIS E DA TEMPERATURA DO AR SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA EM LEITO DE ESPUMA E A RETENÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS.....	42
RESUMO.....	42
2.1 INTRODUÇÃO	43
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	44
2.2.1 Material	44
2.2.2 Preparação dos aditivos	45
2.2.3 Procedimentos	45
2.2.3.1 Secagem da espuma.....	45
2.2.3.2 Cinética de secagem	46
2.2.3.3 Taxa de secagem.....	48
2.2.3.4 Modelos matemáticos empíricos para descrever a cinética de secagem	48
2.2.3.5 Densidade da espuma	49
2.2.3.6 Percentual de expansão ou <i>overrun</i>	50
2.2.4 Metodologia Analítica	50
2.2.4.1 Sólidos totais	50
2.2.4.2 Atividade de água.....	50
2.2.4.3 Cor.....	51
2.2.4.4 Vitamina C	51
2.2.4.5 Carotenoides.....	51

2.2.4.6	Compostos Fenólicos Totais (CFT)	52
2.2.4.7	Retenção	52
2.2.5	Análise estatística	53
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
2.3.1	Caracterização físico-química da polpa de acerola	54
2.3.2	Propriedades da espuma	54
2.3.3	Difusão	56
2.3.4	Modelos matemáticos empíricos para descrever a cinética de secagem	62
2.3.5	Vitamina C	64
2.3.6	Teor total de carotenoides	67
2.3.7	Compostos Fenólicos Totais (CFT)	69
2.3.8	Cor	71
2.4	CONCLUSÕES.....	74
2.5	REFERÊNCIAS.....	75
3-	CARACTERIZAÇÃO DE PÓS DE POLPA DE ACEROLA PRODUZIDOS POR SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA COM AGENTES ESPUMANTES VEGETAIS: ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MORFOLÓGICAS	82
	RESUMO.....	82
3.1	INTRODUÇÃO	83
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS	84
3.2.1	Materiais	84
3.2.2	Preparação das amostras	85
3.2.3	Métodos analíticos	85
3.2.3.1	Solubilidade	86
3.2.3.2	Molhabilidade.....	86
3.2.3.3	Cristalinidade relativa.....	86
3.2.3.4	Morfologia dos pós secos	87
3.2.3.5	Isotermas de sorção	87
3.2.3.6	Análise de cor	88
3.2.4	Análise estatística	89
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
3.3.1	Características do pó de acerola	89
3.3.1.1	Solubilidade	90
3.3.1.2	Molhabilidade.....	91
3.3.2	Cristalinidade relativa	92

3.3.3 Morfologia dos pós	97
3.3.4 Isotermas de sorção de água	99
3.3.5 Cor dos pós reconstituídos	103
3.4 CONCLUSÃO.....	105
3.5 REFERÊNCIAS.....	106
4- ESTABILIDADE NO ARMAZENAMENTO DE PÓ DE ACEROLA OBTIDO POR SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA: ANÁLISE DA RETENÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS AO LONGO DO TEMPO.....	112
4.3 INTRODUÇÃO	113
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	114
4.2.1 Materiais	114
4.2.2 Métodos	114
4.2.2.1 Obtenção da polpa de acerola em pó.....	114
4.2.2.2 Umidade.....	115
4.2.2.3 Atividade de água.....	116
4.2.2.4 Análise de Cor.....	116
4.2.2.5 Vitamina C.....	116
4.2.2.6 Compostos Fenólicos Totais (CFT).....	116
4.2.2.7 Retenção.....	117
4.2.3 Determinação das constantes da taxa de reação	117
4.2.4 Análise Estatística	119
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	119
4.3.1 Vitamina C	119
4.3.2 Compostos fenólicos totais (CFT)	123
4.3.3 Cor	126
4.3.4 Atividade de água e Umidade	129
4.3.5 Análise visual dos pós ao longo do armazenamento	131
4.4 CONCLUSÃO.....	133
4.5 REFERÊNCIAS.....	134
CONCLUSÕES GERAIS.....	137
PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	138
APÊNDICE A – PARÂMETROS DE ATIVIDADE DE ÁGUA (TABELA A.1), UMIDADE (TABELA A.2), VITAMINA C (TABELA A.3), COMPOSTOS FENÓLICOS	

TOTAIS (TABELA A.4) E COR (TABELA A.5) DOS PÓS DE ACEROLA AVALIADOS DURANTE 60 DIAS DE ARMAZENAMENTO..... 139

INTRODUÇÃO GERAL

A busca por alimentos saudáveis e naturais tem crescido consideravelmente nos últimos anos, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias que promovam a conservação de propriedades nutricionais dos alimentos (NASCIMENTO FILHO et al., 2022). Nesse contexto, a acerola, fruto da aceroleira, tem ganhado destaque devido à sua alta concentração de compostos bioativos, como vitamina C, carotenoides e antocianinas, que conferem importantes propriedades nutricionais (MISKINIS; NASCIMENTO; COLUSSI, 2023).

No entanto, devido à sua alta perecibilidade após a colheita, torna-se necessário empregar tecnologias de processamento, para aumentar sua vida útil e preservar suas propriedades benéficas. De acordo com Costa et al. (2022), tem-se utilizado tecnologias de secagem para transformar a polpa da acerola em pó, proporcionando um aumento na disponibilidade do fruto, redução de perdas pós-colheita, valorização do produto e possibilidade de aplicação em grande escala na formulação de alimentos diversos.

Dentro das diversas técnicas de secagem se encontra a secagem em leito de espuma, utilizada para desidratar alimentos líquidos ou semilíquidos. Ela envolve a transformação desses alimentos em espumas estáveis por meio da incorporação de ar através do batimento da mistura e adição de agentes espumantes e estabilizantes. As espumas são então desidratadas em bandejas, em camadas finas, com ar aquecido, até que atinjam o nível de umidade desejado e possam ser moídas para se tornarem pó (AYETIGBO et al., 2023; BEGUM et al., 2023).

Esta técnica de secagem utiliza agentes espumantes ou estabilizantes, visando facilitar o processo de desidratação através da espuma. Conforme Ma et al. (2022), as demandas dos consumidores por dietas mais sustentáveis e saudáveis vêm crescendo, e o mercado busca adaptar-se aos novos públicos como veganos, vegetarianos e flexitarianos e corresponder às novas exigências, como clean-label e produtos à base de plantas. Por essa razão, um dos propósitos da presente pesquisa foi investigar agentes emulsificantes e estabilizantes de origem vegetal.

O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos da composição das espumas e das temperaturas sobre a cinética de secagem e a composição nutricional da polpa de acerola em pó obtida por meio da secagem em leito de espuma. Para avaliar as características dos pós foram realizadas análises das propriedades físico-químicas e morfológicas. Adicionalmente, o armazenamento dos pós em diferentes temperaturas foi monitorado durante um período de 60 dias, a fim de avaliar a estabilidade e a qualidade dos produtos ao longo do tempo.

A tese está dividida em quatro capítulos:

- O capítulo 1 consiste em uma revisão bibliográfica geral sobre os temas investigados, com base em fontes científicas relevantes e atualizadas. Nesta seção, foram abordados conceitos e fundamentos teóricos relacionados ao processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola. Além disso, foram discutidos trabalhos já realizados sobre o uso de diferentes agentes espumantes de origem vegetal e sua influência na qualidade e eficiência do processo de secagem. A revisão bibliográfica também enfocou as lacunas no conhecimento atual e as oportunidades para aprimorar o processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola.

- O capítulo 2 apresenta uma investigação detalhada do processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola, com enfoque na influência das formulações contendo diferentes agentes espumantes de origem vegetal e da temperatura na cinética de secagem. Foram analisados os efeitos desses fatores na retenção de nutrientes como vitamina C, compostos fenólicos totais e carotenoides além de avaliar o parâmetro da cor do pó de acerola. Foram discutidos trabalhos já realizados na área e comparados os resultados obtidos com as formulações desenvolvidas neste estudo. A partir dessas análises, foi possível avaliar a eficiência do processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola com o uso de diferentes agentes espumantes de origem vegetal e identificar os efeitos dos tratamentos sobre a qualidade do produto acabado.

- No capítulo 3, realizou-se uma investigação abrangente das características físicas e morfológicas dos pós de acerola produzidos pelo processo de secagem em leito de espuma. Para isso, foram empregadas diversas técnicas de caracterização de materiais, incluindo análises por microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X e isotermas de sorção. O estudo avaliou ainda o efeito da utilização de diferentes agentes espumantes de origem vegetal e condições de secagem controladas a 60 °C e 70 °C. Além disso, como referência, foi utilizado o pó obtido da liofilização da polpa pura. Os resultados obtidos foram discutidos em termos de suas implicações sobre a qualidade e estabilidade dos pós de acerola.

- No capítulo 4, determinou-se a cinética de degradação dos compostos bioativos presentes nos pós de polpa de acerola, com a finalidade de avaliar os efeitos do armazenamento dos pós submetidos a diferentes temperaturas (5 °C, 25 °C e 35 °C), durante um período de armazenamento de 60 dias. Para isso, foram realizadas análises ao longo do tempo nos pós, mensurando a retenção de compostos fenólicos totais e de vitamina C, além de cor e atividade de água. O estudo permitiu discutir os resultados com base nas implicações sobre a qualidade e estabilidade dos pós de acerola durante o armazenamento.

OBJETIVOS DA PESQUISA

Objetivo Geral

Investigar os efeitos da temperatura e da aplicação de diferentes agentes espumantes de origem vegetal sobre o processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola, a qualidade física e nutricional dos pós de acerola e sua estabilidade durante o armazenamento.

Objetivos Específicos

- Estudar o efeito das formulações (isolado proteico de soja, concentrado de ervilha, ésteres de mono e diglicerídeos de ácido láctico e monoglicerídeos destilados) e das temperaturas sobre a cinética de secagem em leito de espuma e sobre a qualidade física e nutricional dos pós de acerola, com base em análises de composição e retenção de nutrientes (vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos totais), bem como em análises de cor;
- Avaliar propriedades físicas (isotermas de sorção de água, solubilidade, cristalinidade e molhabilidade), morfológicas e cor dos pós reconstituídos;
- Avaliar os efeitos do armazenamento dos pós selecionados (à base de isolado proteico de soja) sobre retenção de compostos fenólicos totais e de vitamina C, cor e atividade de água.

Capítulo 1

Revisão Bibliográfica

1– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Acerola

A acerola, também conhecida por cereja das Antilhas ou cereja de Barbados, é o fruto de uma planta nativa da América Central e do norte da América do Sul que se propagou no Brasil devido a sua boa adaptação às condições edafoclimáticas, sendo que em 2017 foram produzidas 60.966 toneladas de acerola em 5.753 hectares, com destaque para o estado de Pernambuco (IBGE, 2017; NASCIMENTO FILHO et al., 2022).

A aceroleira é uma planta pertencente à família Malpighiaceae, gênero *Malpighia* e espécie *Malpighia emarginata* D.C. Cabe destacar que há muita controvérsia quanto à designação da aceroleira, uma vez que era conhecida por *Malpighia glabra* L. e *Malpighia puniceifolia* L., mas que através de estudos do Herbário de Linnaeus, foi demonstrado que essas duas espécies possuíam características distintas da acerola; a partir de 1986, *M. emarginata* foi adotada para designar a aceroleira pelo International Board for Plant Genetic Resources (IBPGR) (RITZINGER; RITZINGER, 2011).

O fruto possui casca fina, forma globosa e amadurece até uma cor vermelha brilhante. Sua polpa é laranja, muito suculenta e de sabor ácido a subácido, sendo que atrai o interesse de consumidores e da indústria devido ao elevado teor de substâncias benéficas à saúde, como ácido ascórbico, compostos fenólicos, carotenoides, antocianinas e flavonoides (BELWAL et al., 2018; POLETTTO et al., 2021; XU et al., 2020). Os efeitos positivos desses compostos influenciam na prevenção de doenças ou como coadjuvantes em estratégias de tratamento, como aponta Horta et al. (2016) que, ao avaliarem os efeitos protetores do suco de acerola na genotoxicidade induzida pelo ferro *in vivo*, perceberam uma atividade antimutagênica, pela diminuição significativa dos valores médios do micronúcleo na medula óssea.

Um composto presente nesse fruto, que proporciona alguns benefícios muito conhecidos popularmente, é a vitamina C, os quais estão fortemente associados à prevenção, redução e alívio de resfriados causados por vírus respiratórios, pelo seu efeito antioxidante que protege as células contra a ação de espécies reativas de oxigênio (ROS) provenientes do estresse oxidativo decorrente de infecções (HEMILÄ, 2017). Atualmente, devido à disseminação do coronavírus (Covid-19), a população está mais consciente sobre o consumo de alimentos que auxiliam na melhoria do sistema imunológico (NAJA e HAMADEH, 2020).

Além disto, Xu et al. (2022) conduziram uma extensa revisão, na qual coletaram e analisaram de forma sistemática um amplo conjunto de meta-análises e revisões sistemáticas

sobre a ingestão de vitamina C e seus impactos na saúde humana. Os resultados revelaram a ingestão de vitamina C estava associada a um menor risco de doenças cardiovasculares, câncer, problemas respiratórios, neurológicos, oftalmológicos, renais e dentários.

A composição do fruto depende de alguns fatores como condições climáticas, tratamento da cultura, exposição à luz e ao oxigênio, localização geográfica, disponibilidade de água, aplicação de agrotóxicos, estágio de maturação, processamento e armazenamento (MEZADRI et al., 2008).

As frutas frescas possuem alta quantidade de água no seu interior, que proporciona a textura, sabor e disponibilidade orgânica, mas devido ao elevado valor de atividade de água, elas se tornam propícias à ocorrência de diferentes reações químicas, alterações físicas e proliferação microbiana (ZHANG et al., 2017). Após a colheita, as acerolas são bastante perecíveis, se expostas a elevadas temperaturas ambiente, sendo ideal que sejam processadas o mais rápido possível (BELWAL et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2011).

Os produtos industrializados da acerola mais comuns são polpa congelada e sucos (MEZADRI et al., 2008; SILVA et al., 2019) mas outros produtos como néctares, geleias, compotas, licores e sorvetes, também são industrializados, inclusive na forma de suplementos alimentares (PRAKASH; BASKARAN, 2018; SILVA et al., 2019). Atualmente é possível encontrar nas prateleiras de mercados uma grande variedade de produtos com presença de acerola na composição, seja na forma de extrato, de suco ou de acerola desidratada, como balas, barras de cereais, barras de chocolate, pães integrais, biscoitos, iogurte, xaropes, *blends* de sucos de frutas, dentre outros. Constata-se que os pós de acerola têm sido bastante utilizados na indústria de alimentos e bebidas como uma alternativa natural aos suplementos de vitamina C sintéticos e outros antioxidantes artificiais (MATUDA et al., 2023). Além disso, os pós de acerola são utilizados em diversos produtos alimentícios, como bebidas, sobremesas, alimentos infantis, suplementos alimentares, conservantes de carne, produtos de panificação e confeitaria, visando aprimorar o sabor, qualidade e teor de nutrientes e antioxidantes (BELWAL et al., 2018; HAMZEH et al., 2019; MARTÍNEZ-ZAMORA et al., 2021).

1.2 Secagem em leito de espuma

A secagem dos alimentos é uma prática realizada desde a pré-história e até hoje é considerada um dos melhores métodos de conservação de alimentos, cuja técnica se baseia na redução da atividade de água dos alimentos, conferindo-lhes principalmente estabilidade microbiológica (MOUNIR, 2017). A secagem converte um alimento sólido, líquido ou pastoso

em um produto sólido de baixa umidade, o que envolve transferência simultânea de calor e massa (QADRI et al., 2020). A operação de secagem, além de estender o tempo de conservação dos alimentos, também promove redução de massa e volume dos produtos e, com isso, os custos com embalagem, transporte e armazenamento são mais baixos para alimentos desidratados, em comparação com os não desidratados.

Existem várias técnicas disponíveis para a remoção de água de alimentos, sendo a liofilização comumente considerada como o método padrão ou de referência, quando o interesse é produzir alimentos de alto valor nutricional, devido à sua capacidade de preservar a qualidade dos alimentos, em comparação com outras técnicas de desidratação (BHATTA; STEVANOVI; RATTI, 2020). No entanto, a liofilização é um processo longo e caro, devido ao elevado investimento e aos altos custos de energia envolvidos.

A secagem em leito de espuma pode ser uma alternativa promissora para a produção de alimentos em pó a partir de líquidos ou pastas, com alta retenção de compostos bioativos (TAVARES et al., 2017). Essa técnica também é considerada um processo de microencapsulação (PINTO et al., 2018; SUSANTI et al., 2021).

De acordo com Ratti e Kudra (2006), esse método remonta a 1917, quando foi patenteado por Campbell (1917) para a secagem de espuma de leite previamente concentrado. Essa técnica tem o intuito de transformar alimentos líquidos ou semilíquidos, tais como sucos, polpas e purês de frutas e hortaliças, em desidratados na forma de pó, onde esses alimentos são primeiramente transformados em espumas estáveis através de seu batimento na presença de agentes espumantes, para incorporar uma ampla quantidade de ar; em seguida, as espumas formadas são espalhadas em camadas finas em bandejas ou esteiras, e desidratadas com ar aquecido, para, a seguir, serem convertidas em pó, por moagem (HARDY; JIDEANI 2017; KADAM et al., 2010; MOUNIR, 2017; RATTI; KUDRA, 2006).

A secagem em leito de espuma tem recebido grande atenção como uma técnica de secagem eficaz e adequada a certos alimentos, pois, em comparação com outros métodos como liofilização e secagem por atomização, é simples e econômica, pois requer menor investimento, consome menos energia e apresenta menores custos operacionais (ABD EL-SALAM et al., 2021). Ela também permite a desidratação de alimentos difíceis de secar por outros métodos, como materiais muito viscosos, pegajosos e sensíveis ao calor ou, ainda, aqueles que possuem alto teor de açúcar (ABD EL-SALAM et al., 2021; OZCELIK et al., 2019; FRANCO et al., 2016).

Dentre as vantagens que a secagem em leito de espuma pode proporcionar, destaca-se a rapidez com que a umidade se aproxima do seu valor de equilíbrio devido ao aumento de área

superficial, além de ser um processo mais eficiente em termos energéticos, quando comparado à secagem convectiva convencional de alimentos não espumados (CARDOSO et al., 2022; RATTI; KUDRA, 2006). Essas características da secagem em leito de espuma são favoráveis à sua aplicação em diferentes áreas, permitindo a produção de ingredientes de alta qualidade, o que pode trazer benefícios para a indústria de alimentos.

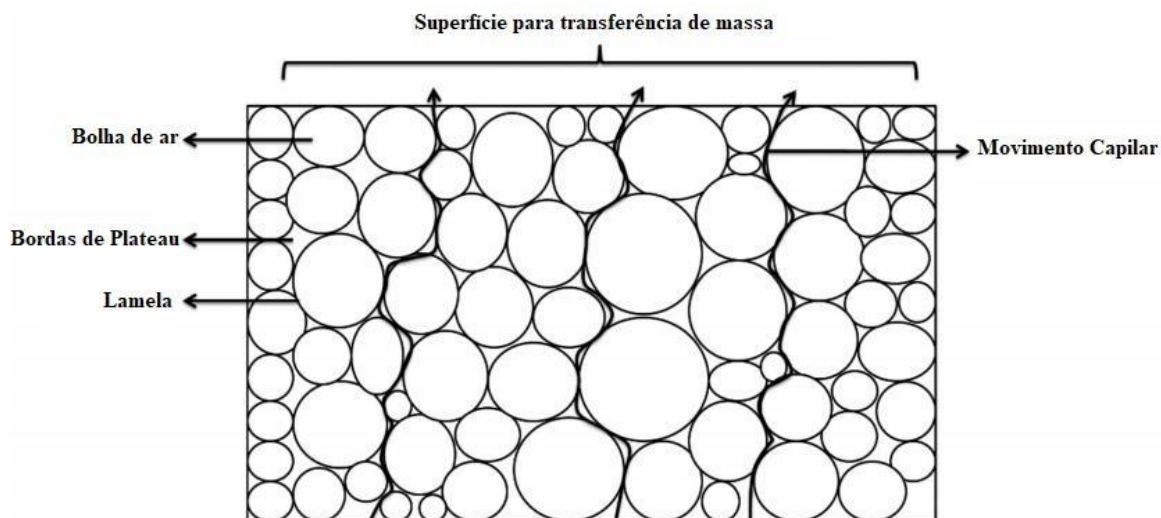
É importante ressaltar que a literatura científica abrange o uso da secagem em leito de espuma predominantemente para a produção de pós a partir de purês de frutas e vegetais. No entanto, mais recentemente, têm sido relatados estudos relacionados ao emprego dessa técnica em frutos do mar, incluindo o camarão (HAMZEH et al., 2019) e o peixe brema japonês (*Nemipterus japonicus*) (MOHAMED et al., 2022), bem como em clara de ovo (KOÇ; ÇABUK, 2020), os quais apresentaram resultados satisfatórios para a obtenção dos pós. Essas descobertas científicas evidenciam o potencial e a versatilidade da secagem em leito de espuma na produção de ingredientes em diversas áreas alimentícias.

A transferência de massa no processo de secagem está relacionada com a difusão da água do interior do sólido para a superfície. Com isso, o aumento da eficiência da secagem em leito de espuma é alcançado porque, com a formação da espuma, ocorre a dispersão do ar no líquido e a geração de minúsculas bolhas, as quais permitem obter uma maior área de superfície interna e reduzem a resistência ao transporte de umidade (OZCELIK et al., 2019).

A grande maioria dos autores atribui à estrutura porosa da espuma as maiores taxas de transferência de massa, quando comparadas com alimentos sólidos, pelo fato de que ela aumenta a área superficial de interface líquido-gás, o que leva a uma rápida secagem, contribuindo para melhorar a retenção de cor e de características nutricionais dos alimentos (KADAM; BALASUBRAMANIAN, 2011; TAVARES et al., 2017).

De acordo com Ratti e Kudra (2006), dispersões de líquido em gás apresentam densidade em torno de 200 kg/m^3 , sendo chamadas de espumas de baixa densidade. Dispersões de gases em líquidos formam espumas com densidade entre 200 e 800 kg/m^3 . Entretanto, a densidade das espumas na secagem em leito de espuma encontra-se numa faixa entre 300 e 600 kg/m^3 . Os autores ainda destacam que, no caso de secagem convectiva de espumas de baixa densidade, o transporte de água através das lamelas (paredes líquidas ao redor das bolhas) seria predominante sobre outros mecanismos de transporte, enquanto na secagem de espumas mais saturadas, as lamelas poderiam atuar como capilares e o transporte de água predominante seria por capilaridade. Qadri et al. (2020) ilustram esse transporte, como pode ser visualizado na Figura 1.1.

Figure 1.1 - Diagrama representacional da estrutura da espuma



Fonte: Qadri et al. (2020).

Sankat e Castaigne (2004) atribuíram o transporte de água em espumas de banana madura principalmente ao transporte capilar. Esses autores partiram da solução analítica do modelo de difusão para placas infinitas, truncado no primeiro termo da série, bem como de uma equação que descreve o transporte capilar. Uma vez que as duas equações são semelhantes, eles propuseram uma simplificação, a qual resultou no modelo de Newton (ERTEKIN; YALDIZ, 2004). Apesar da simplicidade, o modelo foi bem ajustado aos resultados experimentais ao longo de toda a secagem. Esse resultado sugere que o mecanismo de secagem não seja predominantemente difusivo durante todo o processo. Por outro lado, Chaux-Gutierrez et al. (2017) descreveram bem a secagem em leito de espuma de polpa de manga através do modelo difusivo, porém, incluindo a consideração do encolhimento do leito durante todo o processo, o que pode explicar o sucesso do ajuste do modelo aos resultados experimentais.

Por outro lado, Prakotmak et al. (2010), ao estudar o processo de adsorção de água em espuma desidratada de purê de banana, desenvolveram um modelo de rede porosa em 2D para representar o meio, no qual a água seria transportada pelo mecanismo de difusão através das células. Os ensaios foram realizados pelo método estático com auxílio de soluções salinas saturadas para controlar as umidades relativas. O modelo apresentou bom ajuste aos dados experimentais até a umidade relativa de 67%, acima da qual passou a apresentar desvios.

Constata-se, portanto, que os mecanismos de transporte durante a secagem em leito de espuma ainda estão pouco elucidados na literatura. Entretanto, o que se pode afirmar é que a

estrutura das espumas acelera a taxa de secagem e proporciona produtos porosos de fácil moagem e com boas propriedades de reidratação (OZCELIK et al., 2019).

Ainda sobre modelagem, as taxas de transferência de calor em espuma também apresentam particularidades. Uma vez que a condutividade de gases é muito menor que a de líquidos, a presença gasosa poderia prejudicar a eficiência da secagem (RATTI; KUDRA, 2006).

Alguns pontos devem ser verificados detalhadamente na secagem em leito de espuma, pois fatores como a densidade, composição química do alimento, temperatura, velocidade do ar, umidade relativa do ar, concentração e tipo dos agentes espumantes influenciam diretamente na qualidade do produto, além da espessura da camada de espuma, pois quanto mais fina, menos tempo utilizado para atingir a umidade desejada (BAG; SRIVASTAV; MISHRA, 2011; PRASETYANINGRUM; DJAENI, 2012). As espumas, quando secas por convecção usando ar quente fluindo sobre a camada do material espumado, devem possuir uma camada relativamente fina, entre 3 e 10 mm (RATTI; KUDRA, 2006).

Os pós obtidos pela desidratação de frutas, dependendo das condições ambientais, são muito propícios a sofrerem alterações negativas devido a suas características de alta higroscopicidade no estado amorfo, levando à pegajosidade e aglomeração; isso ocorre principalmente pela presença de açúcares de baixo peso molecular e ácidos orgânicos em sua composição, que acarretam baixa temperatura de transição vítrea (BHANDARI; DATTA; HOWES, 1997; JAYA; DAS, 2004).

Portanto, para o entendimento e evolução de estratégias para o controle do processo de secagem em leito de espuma, a verificação do comportamento do material ao longo do processo e a predição do tempo necessário da secagem, se torna necessário. O estudo da cinética de secagem através de modelos matemáticos que representam a perda de água durante o procedimento de secagem, possibilitam a determinação de parâmetros relacionados à transferência de massa (CRUZ et al., 2015).

Os modelos matemáticos usados para prever a cinética de secagem, podem ser agrupados em teóricos, semiteóricos e empíricos, onde a aplicação de cada modelo irá depender do sistema considerado e da particularidade de cada processo.

Nos modelos teóricos de secagem de alimentos em camada fina, o efeito da temperatura é frequentemente negligenciado, uma vez que, em geral, a temperatura não é uniforme apenas no início da secagem. Com essa consideração, o modelo pode ser baseado na segunda lei de difusão de Fick para transferência de massa, a qual permite descrever o perfil de distribuição

de água no interior do produto durante o período de taxa decrescente de secagem (ERBAY; ICIER 2010).

Os métodos empíricos são desenvolvidos com base em dados experimentais, os quais não fornecem indicação sobre o transporte de calor e de massa no interior dos produtos e seu uso é restrito a condições específicas de processo (ONWUDE et al., 2016).

Os modelos semiteóricos de secagem de alimentos em camada fina são derivados da segunda lei da difusão de Fick ou se baseiam na analogia da lei do resfriamento de Newton, nos quais, pressupõe-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto (ERBAY; ICIER 2010).

Cabe destacar que a descrição da secagem de muitos materiais alimentícios geralmente se baseia na segunda lei de difusão de Fick, que proporciona informações importantes dos mecanismos físicos envolvidos no processo de secagem, ainda mais quando as deformações do alimento são consideradas (BRASIELLO et al., 2013).

Sabendo-se da conveniência dos produtos em pó para serem utilizados como ingredientes em diversos produtos tais como *snacks*, bebidas, bolos, sorvetes, molhos, sopas, alimentos infantis, cereais extrusados, produtos de panificação e produtos cárneos, a técnica da secagem em leito de espuma pode ser uma excelente alternativa (HAMZEH et al., 2019; JAKUBCZYKA et al., 2011).

1.3 Aditivos

Segundo a portaria Nº 540, de 27 de outubro de 1997, aditivos alimentares podem ser definidos como sendo qualquer ingrediente adicionado intencionalmente aos alimentos, sem propósito de nutrir, com o objetivo de modificar as características físicas, químicas, biológicas ou sensoriais, durante a fabricação, processamento, preparação, tratamento, embalagem, acondicionamento, armazenagem, transporte ou manipulação de um alimento.

Para uma secagem em leito de espuma com qualidade, vários tipos de aditivos com função de agentes espumantes ou estabilizantes são aplicados para a produção de espumas, onde atuam na redução da tensão interfacial (MOUNIR, 2017). Os agentes estabilizantes podem auxiliar na secagem ao aumentar a temperatura de transição vítrea do produto ou modificar as propriedades reológicas da espuma, evitando, desta maneira, o colapsoda espuma durante a desidratação (RATTI; KUDRA, 2006).

As proteínas geralmente atuam como bons agentes tensoativos, pois proporcionam estabilidade ao sistema espumante por meio de seus grupos hidrofóbicos e possíveis rearranjos

conformacionais que modificam as forças nas interfaces entre as bolhas, com a formação de filmes viscoelásticos que são resistentes à tensão, melhorando a reologia interfacial (HARDY; JIDEANI, 2017). Uma proteína, para ser usada como agente de formação de espuma em alimentos, deve ser eficaz em baixas concentração, atuar em uma ampla faixa de pH e funcionar na presença de outros componentes que podem inibir a formação de espuma como gorduras, álcool ou substâncias aromatizantes (ZAYAS, 1997).

A proteína do ovo tem sido tradicionalmente utilizada para o processo de secagem em leite de espuma, entretanto, devido a preocupações crescentes relacionadas às restrições alimentares associadas às proteínas do leite e do ovo (BURGER; ZHANG, 2019) e às novas tendências em dietas, como as flexitarianas, vegetarianas e veganas, a utilização de proteínas vegetais tem se tornado uma alternativa atrativa para esse processo (MA et al., 2022). As leguminosas, em particular, são reconhecidas por serem uma importante fonte de proteínas vegetais de alto valor nutricional (ASLAN; ERTAŞ, 2020).

O isolado proteico de soja, que deve possuir um mínimo de 90% de conteúdo de proteína, é produzido a partir da farinha de soja desengordurada por extração alcalina, seguida de precipitação ácida. A proteína de soja é a maior fonte de proteína vegetal disponível comercialmente, com elevado valor nutricional, baixo custo e altamente funcional devido às características de superfície ativa de suas proteínas constitutivas, proporcionando propriedades de emulsificação e gelificação (ACHOURI et al., 2012; SORGENTINI et al., 1995; ZANG et al., 2019).

As proteínas encontradas na soja são uma combinação de albuminas e globulinas, das quais 90% são consideradas proteínas de armazenamento e têm uma estrutura globular. As duas proteínas principais na soja são a β -conglucina (7S), que representa 35% da composição proteica da soja, e a glicina (11S), que constitui 52% da sua estrutura proteica total. Além disso, foram identificadas mais duas categorias, a saber, as frações 2S (8%) e 15S (5%) (TIAN et al., 2018; TRAN; ROUSSEAU, 2013). O ponto isoelétrico (pI) da solução de proteína de soja é situado na faixa de pH que varia de 4,5 a 5 (JARAMILLO; ROBERTS; COUPLAND, 2011; LAM; PAULSEN; CORREDIG, 2008).

Além de auxiliar no melhoramento do processamento, a proteína de soja apresenta a vantagem de possuir componentes fisiologicamente benéficos para a saúde que reduzem o risco de colesterol e doenças cardiovasculares, além de conter todos os aminoácidos essenciais em sua composição (NISHINARI et al., 2014).

Devido à sua estrutura terciária compacta, a proteína de soja nativa tem propriedades limitadas de formação de espuma e emulsificação (WAGNER; GUÉGUEN, 1999). Portanto,

as modificações estruturais permitem uma maior flexibilidade conformacional da proteína, podendo melhorar seu comportamento superficial e sua funcionalidade. De acordo com Wang et al. (2019), quando um tratamento térmico adequado é aplicado às proteínas de soja, estas podem melhorar a estabilidade de espuma, devido à exposição de aglomerados hidrofóbicos no interior da molécula.

Nesse sentido, outra proteína que tem atraído a atenção como ingrediente proteico, devido à baixa alergenicidade e ao alto valor nutricional, além de ser derivada de uma cultura sustentável, é a proteína de ervilha (DING et al., 2020). Apesar de todas as proteínas possuírem natureza anfifílica, que as faz migrar para interfaces ar-água ou óleo-água, suas propriedades superficiais podem diferir bastante de uma proteína para outra (DAMODARAN et al., 2010).

As ervilhas amarelas são compostas, em média, por 25% de proteína, 55% a 68% de amido e 6,5% de fibra, sendo que as proteínas das sementes de ervilha são compostas principalmente 11S (legumina), 7S (vicilina) e 2S (albuminas) (ALUKO et al., 2009). O ponto isoelétrico (pI) das proteínas da ervilha é aproximadamente a 4,3 (DOAN e GLOSH, 2019).

A proteína de ervilha mostrou-se promissora, com desempenho superior ao SPI como agente formador de espuma e emulsificante, em algumas das condições de concentração e pH estudadas por Aluko et al. (2009). Entretanto, de acordo com Burger e Zhang (2018), propriedades emulsificantes do isolado proteico de ervilha dependem da cultivar e de suas propriedades físico-químicas, as quais, por sua vez, podem ser afetadas pelos métodos e condições de isolamento aplicados.

Mohanan et al. (2020) também observaram que, em presença de goma xantana, os concentrados de proteína de ervilha foram considerados mais adequados para gerar espumas estáveis do que os isolados, provavelmente devido à presença de amido e outros polissacarídeos presentes no concentrado proteico.

O uso de emulsificantes e estabilizantes comerciais para incorporação de ar em sorvetes também tem sido bastante efetivo na secagem em leito de espuma. Pinto et al. (2018) obtiveram extratos em pó com alto conteúdo de carotenoides ao encapsularem extrato de pequi emulsificado em solução de maltodextrina e utilizarem composto comercial Emustab para formar a espuma. O Emustab é composto de agentes estabilizantes (monoglicerídeos de ácidos graxos destilados e sais de ácidos graxos) e emulsificantes (monoestearato de sorbitana e polioxietileno de monoestearato de sorbitana).

O aditivo 'Ésteres de mono e diglicerídeos de ácidos graxos com ácido láctico', 472b conforme a denominação do Sistema Internacional de Numeração de Aditivos (INS), é mais conhecido por LACTEM, sendo também referido como ésteres de ácido láctico de mono e

diglicerídeos de ácidos graxos, ésteres de ácido láctico de mono e diglicerídeos, lactoglicerídeos, mono e diglicerídeos de ácidos graxos esterificados com ácido láctico e mono e diglicerídeos lactilados (GAUPP; ADAMS, 2015). São produzidos por esterificação de mono e diglicerídeos ou a partir monoglicerídeos destilados com ácido láctico (GAONKAR; MCPHERSON, 2016). Esse surfactante pode ser produzido a partir de matérias primas de origem vegetal, como o LACTEM P22 comercializado pela Du Pont, que é fabricado com óleo de semente de palma. LACTEMs são frequentemente referidos como “ α -tending”, devido a serem monomórficos, serem estáveis apenas na forma α -cristalina, abaixo do seu ponto de fusão, e serem solúveis em óleo. Com isso, têm ampla aplicação na indústria de alimentos, para melhorar a incorporação de ar e a estabilidade em cremes, recheios, mousses e coberturas (ALLEN et al., 2008; GAONKAR; MCPHERSON, 2016). Normalmente o LACTEM é aplicado em combinação com outros monoglicerídeos em produtos comerciais, a fim de modular a viscosidade e a textura, causa aumento da viscosidade (MUNK et al., 2013).

Na sequência, os monoglicerídeos destilados (DMG) de origem vegetal também podem ser uma alternativa como um agente de aeração para formar e estabilizar espumas. Eles podem ser fabricados a partir de óleo de girassol, colza, palma ou soja. Os monoglicerídeos em sua forma pura (com um teor de monoéster de 90-95%) têm aplicação ampla na indústria de alimentos não somente como emulsificante, mas também como promotores da cristalização da gordura (KROG; LARSSON, 1968; CHEN, 2015).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) não estabelece limites para a utilização do isolado da proteína de soja e concentrado da proteína de ervilha. Por outro lado, a ANVISA autoriza o uso dos aditivos mono e diglicerídeos de ácidos graxos (INS 471) e ésteres de mono e diglicerídeos com ácido láctico (INS 472b), com limite q.s. (*quantum satis*) para o uso em diversos alimentos como gelados comestíveis, balas, confeitos, bombons, chocolates e similares, sobremesas, bebidas não alcoólicas, produtos de panificação e biscoitos e preparações culinárias industriais.

Entretanto, para suplementos alimentares, a ANVISA só autoriza os monos e diglicerídeos de ácidos graxos (INS 471) na quantidade suficiente para obter o efeito tecnológico necessário (q.s.p.), mas não permite o uso de ésteres de mono e diglicerídeos com ácidos lácticos (INS 472b) (RDC N°239 DE 26 DE JUNHO DE 2018). Essa mesma resolução limita o uso do aditivo INS 471 a 0,4 g para cada 100 g de alimento para uso em suplementos alimentares de crianças de 0 a 36 meses e proíbe o uso do aditivo INS 472b como aditivo em suplementos alimentares. Para fórmulas infantis (RDC. N° 46, DE 19 DE SETEMBRO DE 2011) a restrição é similar, sendo os ésteres de mono e diglicerídeos com ácidos cítricos (INS












472c) permitidos com restrições. Outra categoria de alimentos que apresenta restrições em relação a esses aditivos é a de massas alimentícias. Com isso, os limites máximos devem ser levados em considerações conforme a particularidade do preparo de cada alimento, de modo que na sua composição, não seja excedida a concentração de aditivos permitidos.

1.4 Estado da arte em secagem em leito de espumas elaboradas com ingredientes de origem vegetal

Com o objetivo de obter informações atualizadas e relevantes sobre a secagem em leito de espuma de alimentos e aditivos de origem vegetal, foram consultadas diversas bases de dados, incluindo PubMed, Web of Science, Scopus e Science Direct. O termo chave utilizado foi “foam-mat drying”. Preferencialmente, foram selecionados estudos publicados após 2018, considerando sua relevância para o tema em questão. No entanto, devido à escassez de publicações em algumas seções selecionadas, alguns artigos publicados antes de 2018 também foram considerados.













Para a elaboração da Tabela 1.1, os artigos selecionados foram cuidadosamente avaliados e apresentados com uma breve descrição da pesquisa, sendo que esses estudos utilizaram exclusivamente aditivos de origem vegetal no processo de secagem em leito de espuma para produção de pós. Esta revisão enfatiza os principais parâmetros avaliados e os resultados promissores obtidos.

Tabela 0.1 – O efeito do agente espumante/estabilizador, das condições de formação de espuma e do processo de secagem nas propriedades do pó de frutas e vegetais secos através da secagem em leito de espuma

Matéria-prima		Condição de secagem	Efeitos obtidos da secagem - Retenção de nutrientes	Referência
Fruta (espécie)	Aditivos			
Melão (<i>Cucumis melo</i>)	SPI e CMC	 (5; 7; 5 e 10%) SPI e (0; 0,5 e 1%) CMC  2, 4 e 6 min  50, 60 e 70 °C	O processo de secagem da polpa com espuma resultou em pó de melão com excelentes propriedades de fluidez. A condição de preparação da espuma foi otimizada (8,95% SPI; 0,53% CMC e 5 min de batimento) e, com ela, a cinética de secagem e propriedades físicas do pó foram determinadas para três temperaturas de processo.	Asokapandian et al. (2015)
Romã	CMC; LS; Extrato de saponina das plantas saponária e castanha-da-índia	 (0,01; 0,02; 0,03 e 0,04% do volume do suco) CMC e LS com (0,1; 0,2; 0,3 e 0,4% do volume do suco) de extrato;  1, 3, 5 e 10 min;  1 e 2 mm;  50, 60 e 70 °C	A secagem foi conduzida na condição ideal (0,03% CMC com extrato de saponina extraído da saponária) e causou redução dos teores de fenólicos totais e vitamina C em relação à matéria prima. A maior diminuição da vitamina C foi a 70 °C, mas o conteúdo final ainda foi alto, o que foi atribuído ao menor tempo de secagem na maior temperatura. A atividade antioxidante aumentou, possivelmente devido ao extrato de saponina, ou ainda por causa de derivados de reações como a de escurecimento não enzimático. O estudo também mostrou que o extrato de saponina pode ser usado como agente espumante alternativo na secagem em leito de espuma.	Aktas e Tontul (2020)
Pêssego (<i>Prunus persica</i>)	SPI; PPI e CMC	 (0,5 %p/p, 1% p/p e 1,5%p/p) SPI ou PPI com 0,5%p/p CMC;  25 min;  3, 5 e 7 mm  65, 70 e 75 °C	O pó de pêssego seco contendo PPI mostrou retenção significativamente maior de componentes bioativos e boas características físicas, térmicas e morfológicas em comparação com o agente espumante SPI. Condições ideais da secagem de purê de pêssego em leito de espuma foi com PPI e SPI a 65 °C, 3 mm de espuma e 0,85-0,90% de concentração.	Brar et al. (2020)










Continua...

Tabela 1.1 – Continuação

Matéria-prima		Condição de secagem	Efeitos obtidos da secagem - Retenção de nutrientes	Referência
Fruta (espécie)	Aditivos			
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	SPI	 (1-5%) SPI;  2-14 min;  4 mm;  50 °C	<p>O estudo apresenta a otimização das condições de preparação das espumas, com base na avaliação dos pós após a secagem a 50 °C. O resultado indicou que a concentração de SPI é o parâmetro principal que afeta as características físicas e fitoquímicas do pó de tomate obtido pela secagem em leito de espuma. Além disso, os resultados sugerem que o SPI é um agente espumante promissor, ao aumentar o teor de compostos bioativos e a atividade antioxidante do pó de tomate, o que pode ser atribuído ao conteúdo natural de polifenóis presente na soja. As condições de formação de espuma de 5% SPI e 8 min de agitação permitiram produzir um pó de tomate com estrutura porosa e melhores propriedades físicas e fitoquímicas.</p>	Farid et al. (2022)
Morango (<i>Fragaria ananassa</i>)	SPI	 (0,5 - 9%) SPI  1-8 min  4 mm;  50 °C	<p>O conteúdo fenólico total, o conteúdo total de flavonoides, a atividade antioxidante, a capacidade de retenção de água e a capacidade de retenção de óleo aumentaram em cerca de 26, 47, 166, 21 e 48%, respectivamente, com aumento na concentração de proteína isolada de soja, em relação à amostra controle, o que foi atribuído ao conteúdo natural de polifenóis presente na soja. A concentração ótima de SPI e o tempo de batimento foram encontrados na faixa de 5,5 a 9% e 4,6 a 5,7 min</p>	Farid et al. (2023)
Arilo do Maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	MC	 (0,75%; 1,5%; 2,25% e 3,0%) MC  0, 10, 20 e 25 min  1, 2 e 3 mm  60, 70 e 80 °C	<p>O estudo constatou que a espuma de arilo de maracujá secada a 70°C com 1 mm de espessura apresentou a maior retenção de compostos bioativos e atividade antioxidante. Além disso, o processo de secagem por espuma reduziu a carga microbiana e o produto seco foi considerado seguro. A condição ideal para formar espuma foi 2,25% de MC após 25 min de batimento.</p>	Khamjae e Rojanakorn (2018)












Continua...

Tabela 1.1 – Continuação

Fruta (espécie)	Aditivos	Condição de secagem	Efeitos obtidos da secagem - Retenção de nutrientes	Referência
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	Aquafaba de ervilha verde (GPA)	 (0%; 7,5%; 15% e 20%) GPA;  5 mm;  50, 60 e 70 °C	As condições de secagem de curto tempo devido à baixa densidade obtida nas espumas com a incorporação de GPA e à alta temperatura foram efetivas na preservação de compostos bioativos do tomate em pó e aumentaram a retenção do conteúdo fenólico, enquanto proporcionaram maior qualidade nutricional ao produto, devido à menor exposição do alimento ao calor.	Kilicli et al. (2022)
Melão cantaloupe (<i>Cucumis melo</i> L.)	GA e MC	 (0%; 5%; 10% e 15% p/p) GA com 1% de solução de MC;  10 min;  3 mm;  50 °C	Os compostos fenólicos totais nos pós resultaram muito inferiores com a presença de GA, porém, o aumento de sua concentração de 5% para 15% não apresentou diferença significativa entre eles. A redução dos carotenoides diminuiu bastante, mas mostrou alguma proporção com a concentração de GA. Os autores atribuíram a redução dos compostos bioativos ao alto percentual de GA incorporado no suco de melão, provocando a diluição do suco. O pó produzido com maior concentração de GA apresentou boa fluidez e menor coesividade.	Li et al. (2021)
Manga Tommy Atkins (<i>Mangifera indica</i>)	LS e CMC	 (0- 1,50 g/100 g) de LS e CMC;  53, 60, 70 e 80 °C	Os autores destacam que a temperatura de 80 °C e a concentração de 0,30 g/100g de CMC e LS otimizou a retenção de compostos fenólicos e antioxidantes durante a secagem. Essas condições também mostraram um bom desempenho na retenção de carotenoides e na melhoria dos parâmetros físico-químicos da amostra.	Lobo et al. (2017)

Continua...

Tabela 1.1 – Continuação

Matéria-prima		Condição de secagem	Efeitos obtidos da secagem - Retenção de nutrientes	Referência
Fruta (espécie)	Aditivos			
Jaca (<i>Artocarpus heterophyllus</i>)	MD; GMS; PS; MC	 MC (0,5% p/p), GMS (2% a 4% p/p) ou PS (0,5% a 1,5% p/p) e MD (3% a 5% p/p);  4 mm;  70 °C	Pós de polpa de jaca foram produzidos com diferentes agentes espumantes e estabilizadores, sendo que na condição ótima (0,5% MC e 3,96% MD e 3,01% GMS) apresentaram a melhor aceitação sensorial e propriedades funcionais dentro da faixa desejável. A avaliação da polpa não espumada demonstrou características bem inferiores.	Priyadarshini et al., (2023)
Maracujá roxo (<i>Passiflora edulis Sims</i>)	MC	 1-3% MC;  1-5 min;  3 mm;  40- 60 °C	O estudo revelou que o pó de maracujá roxo apresentou boa quantidade de β -caroteno e de ácidos fenólicos totais, demonstrando que a secagem em leito de espuma é um método eficaz para produzir o pó de maracujá. As condições ótimas do processo de secagem em leito de espuma foram de 2,58 min e concentração de MC de 2,58%.	Samyori, Deka e Das (2021)
Tâmara	MD; GA; goma guar; goma xantana	 (0,5; 1 e 2%) com goma guar ou xantana com polpa de tâmara e agentes carreadores (40 e 50%) MD ou GA;  5 min;  1,5 cm;  Amostras foram liofilizadas	Os pós produzidos com MD apresentaram baixo tempo de molhabilidade e maior solubilidade do que os com GA, indicando boas propriedades de reconstituição. Assim, os pós adicionados de MD podem ser mais desejáveis para aplicações em alimentos instantâneos. A baixa higroscopicidade proporcionada pelos agentes carreadores confere boa estabilidade aos pós. A GA preservou melhor os compostos fenólicos totais nos pós do que a MD.	Seerangurayar et al. (2018)

Carboximetilcelulose (CMC); Goma arábica (GA); Isolado de Proteína de Ervilha (PPI); Isolado de proteína de soja (SPI); Lecitina de soja (LS); Maltodextrina (MD); Metilcelulose (MC); Monoestearato de glicerol (GMS); Proteína de Soja (PS)

Sendo que:  Concentração de aditivos;  tempo de agitação;  espessura das bandejas e  temperatura de secagem.

A Tabela 1.1 apresenta um levantamento de pesquisas que aplicam apenas aditivos de origem vegetal na secagem em leito de espuma, e os resultados indicam que o uso desses aditivos nesse processo tem recebido crescente atenção, como evidenciado pelo aumento significativo na publicação de trabalhos nos últimos três anos. No entanto, apesar dos avanços nessa área, ainda há lacunas significativas na compreensão das propriedades nutricionais e funcionais dessas proteínas, o que pode limitar sua aplicabilidade. Embora a proteína de soja seja a mais estudada até o momento e amplamente utilizada como substituto de proteínas de origem animal, a pesquisa sobre a exploração de novas fontes de proteínas vegetais com potencial nutricional e funcional está crescendo, ainda que lentamente (BOUCHARD et al., 2022; FERNANDO, 2021; MA et al., 2022; ZHOU et al., 2023). Por exemplo, de acordo com a revisão da literatura mais recente, apenas Brar et al. (2021) investigaram a aplicabilidade de proteína de ervilha na formação de espumas.

Um outro aspecto relevante observado nesse levantamento de estudos é que a grande maioria avalia os efeitos da técnica de secagem em leito de espuma, das propriedades dos agentes espumantes e estabilizantes utilizados na formação de espuma, e das condições de formação e secagem da espuma sobre a retenção de compostos bioativos específicos, como compostos fenólicos, carotenoides e vitamina C, que são facilmente degradados pelo calor.

Observou-se uma característica importante nas pesquisas mencionadas, onde os autores reconhecem que a tecnologia de secagem em leito de espuma, independentemente dos aditivos e concentrações aplicados, é adequada para produzir alimentos em pó com alta retenção de compostos bioativos. No entanto, é importante destacar que a aplicação dessa técnica pode apresentar desafios e obstáculos a serem superados, uma vez que vários parâmetros podem influenciar no sucesso da obtenção de um pó de boa qualidade.

Dessa forma, é fundamental concentrar esforços na busca por novas fontes de proteínas vegetais com potencial de uso na indústria de alimentos, além de compreender a concentração necessária para obter uma espuma estável e, principalmente, a preparação dessas proteínas para serem incorporadas como agentes espumantes. As proteínas são moléculas complexas cuja funcionalidade depende do meio onde será dissolvida, especialmente devido ao pH, assim como é fortemente influenciada pela desnaturação. Essas variáveis afetam a capacidade de formar e estabilizar espumas.

Dentre os artigos, por exemplo, Brar et al. (2021) utilizaram proteínas em pó diretamente nos purês de pêssego, enquanto Farid et al. (2023) prepararam uma solução de 32%, dissolvendo o pó de SPI em água destilada na proporção de 1:2 p/p (SPI: água destilada), para garantir a completa dissolução do pó de SPI na mistura. Tais procedimentos destacam a

necessidade de investigar com mais detalhes a influência da preparação das espumas sobre a funcionalidade dos aditivos, especialmente das proteínas vegetais, para aplicação adequada na secagem em leito de espuma, além de expandir seu potencial de aplicabilidade na indústria alimentícia.

REFERÊNCIAS

ABD EL-SALAM, E.; ALI, A. M.; HAMMAD, K. S. Foaming process optimization, drying kinetics and quality of foam mat dried papaya pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, n. 4, p.1449–1461, 2021.

ACHOURI, A.; ZAMANI, Y.; BOYE, J. I. Stability and physical properties of emulsions prepared with and without soy proteins. **Journal of Food Research**, v. 1, n. 1, p. 254, 2012.

AKTAS, R. N.; TONTUL, I. Usability of soapwort and horse chestnut saponin extracts as foaming agents in foam mat drying of pomegranate juice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 2, p. 786-793, 2021.

ALLEN, K.E.; MURRAY, B.S.; DICKINSON, E. Whipped cream-like textured systems based on acidified caseinate-stabilized oil-in-water emulsions. **International Dairy Journal**, v. 18, n. 10-11, p. 1011-1021, 2008.

ALUKO, R.E.; MOFOLASAYO, O.A.; WATTS, B.M. Emulsifying and foaming properties of commercial yellow pea (*Pisum sativum* L.) seed flours. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 20, p. 9793-9800, 2009.

ASLAN, M.; ERTAŞ, N. Foam drying of aquafaba: Optimization with mixture design. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 3, p. e15185, 2021.

ASOKAPANDIAN, S.; VENKATACHALAM, S.; SWAMY, G. J.; KUPPUSAMY, K. Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, n. 6, p. 692-701, 2016.

AYETIGBO, O.; LATIF, S.; IDRIS, W.; MÜLLER, J. Physical properties of white-fleshed and yellow-fleshed cassava (*Manihot esculenta*) foam powder. **Powder Technology**, v. 420, p. 118366, 2023.

BAG, S. K.; SRIVASTAV, P. P.; MISHRA, H. N. Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 8, p. 1450-1458, 2011.

BHANDARI, B. R.; DATTA, N.; HOWES, T. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 671-684, 1997.

BHATTA, S.; STEVANOVIC JANEZIC, T.; RATTI, C. Freeze-drying of plant-based foods. **Foods**, v. 9, n. 1, p. 87, 2020.

BEGUM, A.; KALITA, D.; BHATTACHARYA, S.; SRIVASTAVA, B. Time-dependent rheological behavior of pineapple pulp foam and its relationship with foaming properties and quality attributes of dried powder. **Journal of Food Engineering**, v. 336, p. 111208, 2023.

BELWAL, T.; DEVKOTA, H. P.; HASSAN, H. A.; AHLUWALIA, S.; RAMADAN, M. F.; MOCAN, A.; ATANASOV, A. G. Phytopharmacology of Acerola (*Malpighia* spp.) and its potential as functional food. **Trends in Food Science & Technology**, v. 74, p. 99- 106, 2018.

BOUCHARD, J.; MALALGODA, M.; STORSLEY, J.; MALUNGA, L.; NETTICADAN, T.; THANDAPILLY, S. J. Health benefits of cereal grain-and pulse-derived proteins. **Molecules**, v. 27, n. 12, p. 3746, 2022.

BRAR, A.S; KAUR, P.; KAUR, G.; SUBRAMANIAN, J.; KUMAR, D.; SINGH, A. Optimization of Process Parameters for Foam-Mat Drying of Peaches. **International Journal of Fruit Science**, v. 20, n. sup3, p. S1495-S1518, 2020.

BRASIELLO, A.; ADILETTA, G.; RUSSO, P.; CRESCITELLI, S.; ALBANESE, D.; DI MATTEO, M. Mathematical modeling of eggplant drying: shrinkage effect. **Journal of Food Engineering**, v. 114, n. 1, p. 99-105, 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. **PORTARIA Nº 540, DE 27 DE OUTUBRO DE 1997**. Aprova o Regulamento técnico: aditivos alimentares - definições, classificação e emprego. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33916/417403/PORTARIA_540_1997.Pdf/25cbd1e0-ecf3-4cc3-8039-ba460182e4d>. Acesso em: 24 de junho de 2021.

BRASIL. **Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) - RDC Nº 239, DE 26 DE JULHO DE 2018**. Estabelece os aditivos alimentares e coadjuvantes de tecnologia autorizados para uso em suplementos alimentares. Disponível em: < http://antigo.anvisa.gov.br/documents/10181/3898839/%286%29RDC_239_2018_COMP.pdf/dddf530e-377d-40b3-ae9c-f119a972f664>. Acesso em: 25 de junho de 2021.

BURGER, T. G.; ZHANG, Y. Recent Progress in the Utilization of Pea Protein as an Emulsifier for Food Applications. **Trends in Food Science & Technology**, 2019.

CAMPBELL, C.H. Drying milk. US Patent 1250427, 1917.

CARDOSO, C. E. D. F.; LOBO, F. A. T. F.; TEODORO, A. J. Influence of foam mat drying on the nutritional and technological potential of fruits—a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 1-15, 2022.

CHAUX-GUTIÉRREZ, A. M.; SANTOS, A. B.; GRANDA-RESTREPO, D. M.; MAURO, M. A. Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 631-641, 2017.

CHEN, L. Emulsifiers as food texture modifiers. In: **Modifying Food Texture**, Volume 1: Novel Ingredients and Processing Techniques, Edited by Jianshe Chen; Andrew Rosenthal. Chapter 2, p. 27-49. Sawston, UK: Woodhead Publishing, 2015.

COSTA, K.; SILVA, L. S.; KOBORI, C. N.; DA SILVA, A. M.; NICOLI, J. R. Microencapsulation of *Bifidobacterium longum* 51A cells by spray drying and its incorporation in acerola (*Malpighia emarginata*) pulp powder. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 57, n. 1, p. 323-329, 2022.

CRUZ, A. C.; GUINÉ, R. P.; GONÇALVES, J. C. Drying kinetics and product quality for convective drying of apples (cvs. *Golden Delicious* and *Granny Smith*). **International Journal of Fruit Science**, v. 15, n. 1, p. 54-78, 2015.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed., Porto Alegre: Artmed, 2010, 900p.

DING, J.; LIANG, R.; YANG, Y.; SUN, N.; LIN, S. Optimization of pea protein hydrolysate preparation and purification of antioxidant peptides based on an in silico analytical approach. **LWT**, v. 123, p. 109126, 2020.

DOAN, C. D.; GHOSH, S. Formation and stability of pea proteins nanoparticles using ethanol-induced desolvation. **Nanomaterials**, v. 9, n. 7, p. 949, 2019.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 5, p. 441- 464, 2010.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.

FARID, E.; MOUNIR, S.; TALAAT, E.; ELNEMR, S.; SILIHA, H. Effect of foaming parameters on the physical and phytochemical properties of tomato powder. **Food Science and Biotechnology**, v. 31, n. 11, p. 1423-1431, 2022.

FARID, E.; MOUNIR, S.; SILIHA, H.; EL-NEMR, S.; TALAAT, E. Effect of soy protein isolate concentration and whipping time on physicochemical and functional properties of strawberry powder. **Journal of Food Measurement and Characterization**, p. 1-12, 2023.

FERNANDO, S. Pulse protein ingredient modification. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 3, p. 892-897, 2022.

FRANCO, T.S.; PERUSSELLO, C.A.; ELLENDERSEN, L.N.; MASSON, M.L. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. **LWT-Food Science and Technology**, v. 66, p. 503-513, 2016.

GAUPP, R.; ADAMS, W. Acid esters of mono-and diglycerides. **Emulsifiers in food technology**, p. 93-120, 2015.

GAONKAR, A.G.; MCPHERSON, A. **Ingredient Interactions: Effects on Food Quality**. CRC press, 2016.

HAMZEH, S.; MOTAMEDZADEGAN, A.; SHAHIDI, S. A.; AHMADI, M.; REGENSTEIN, J. M. Effects of drying condition on physico-chemical properties of foam-mat dried shrimp powder. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 28, n. 7, p. 794-805, 2019.

HEMILÄ, H. Vitamin C and infections. **Nutrients**, v. 9, n. 4, p. 339, 2017.

HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 12, p. 2560-2572, 2017.

HORTA, R. N.; KAHL, V. F. S.; SARMENTO, M. D. S.; NUNES, M. F. S.; PORTO, C. R. M.; ANDRADE, V. M. D.; FERRAZ, A.B.F.; SILVA, J. D. Protective effects of acerola juice on genotoxicity induced by iron in vivo. **Genetics and Molecular Biology**, v. 39, p. 122- 128, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Produção e área nos estabelecimentos agropecuários com mais de 50 pés existentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/acerola/br>. Acesso em: 11 de janeiro de 2023

JAKUBCZYKA, E.; GONDEKA, E.; TAMBORB, K.; JAKUBCZYK, E.; GONDEK, E.; TAMBOR, K. Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method. In: **ICEF 11 International Congress on Engineering and Food**. Athens, Greece: International Association of Engineering and Food, 2011.

JAYA, S.; DAS, H. Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 2, p. 125-134, 2004.

JARAMILLO, D. P.; ROBERTS, R. F.; COUPLAND, J. N. Effect of pH on the properties of soy protein-pectin complexes. **Food Research International**, v. 44, p. 911-916, 2011.

KADAM, D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 4, p. 488-495, 2011.

KADAM, D. M.; PATIL, R. T.; KAUSHIK, P. Foam mat drying of fruit and vegetable products. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits**, v. 1, n. 1, p. 111-124, 2010.

KHAMJAE, T.; ROJANAKORN, T. Foam-mat drying of passion fruit aril. **International Food Research Journal**, v. 25, n. 1, p. 204-212, 2018.

KILICLI, M.; EROL, K. F.; TOKER, O. S.; TORNUK, F. Production of tomato powder from tomato puree with foam-mat drying using green pea aquafaba: drying parameters and bioaccessibility of bioactive compounds. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2022.

KOÇ, G. Ç.; ÇABUK, B. Characterization of the foam-mat dried egg white powder. **Gıda**, v. 45, n. 1, p. 150-160, 2020.

KROG, N.; LARSSON, K. Phase behaviour and rheological properties of aqueous systems of industrial distilled monoglycerides. **Chemistry and Physics of Lipids**, v. 2, n. 1, p. 129-143, 1968.

- LAM, M.; PAULSEN, P.; CORREDIG, M. Interactions of soy protein fractions with highmethoxyl pectin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 4726-4735, 2008
- LI, T. S.; SULAIMAN, R.; RUKAYADI, Y.; RAMLI, S. Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe. **Food Hydrocolloids**, v. 116, p. 106492, 2021.
- LOBO, F. A.; NASCIMENTO, M. A.; DOMINGUES, J. R.; FALCÃO, D. Q.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; DE LIMA ARAUJO, K. G. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 221, p. 258-266, 2017.
- MA, K. K.; GREIS, M.; LU, J.; NOLDEN, A. A.; MCCLEMENTS, D. J.; KINCHLA, A. J. Functional performance of plant proteins. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 594, 2022.
- MATUDA, T. G.; HOSHINO, L. M.; RIBEIRO, E. P.; TADINI, C. C. The influence of polydextrose on freeze-dried unripe acerola (*Malpighia emarginata* DC.) by the concept of a state diagram. **Journal of Food Engineering**, v. 341, p. 111349, 2023.
- MARTÍNEZ-ZAMORA, L.; PEÑALVER, R.; ROS, G.; NIETO, G. Substitution of synthetic nitrates and antioxidants by spices, fruits and vegetables in Clean label Spanish chorizo. **Food Research International**, v. 139, p. 109835, 2021.
- MEZADRI, T.; VILLAÑO, D.; FERNÁNDEZ-PACHÓN, M. S.; GARCÍA-PARRILLA, M. C.; TRONCOSO, A. M. Antioxidant compounds and antioxidant activity in acerola (*Malpighia emarginata* DC.) fruits and derivatives. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 21, n. 4, p. 282-290, 2008.
- MISKINIS, R. D. A. S.; DO NASCIMENTO, L. Á.; COLUSSI, R. Bioactive Compounds from Acerola Pomace: A review. **Food Chemistry**, p. 134613, 2022.
- MOHANAN, A.; NICKERSON, M. T.; GHOSH, S. Utilization of pulse protein-xanthan gum complexes for foam stabilization: The effect of protein concentrate and isolate at various pH. **Food chemistry**, v. 316, p. 126282, 2020.
- MOHAMED, A. A.; ISMAIL-FITRY, M. R.; ROZZAMRI, A.; BAKAR, J. Effect of foam-mat drying on kinetics and physical properties of Japanese threadfin bream (*Nemipterus japonicus*) powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 3, p. e16376, 2022.
- MOUNIR, S. Foam mat drying. **Drying Technologies for Foods-Fundamentals and Applications**, p. 169-191, 2017.
- MUNK, M. B.; MARANGONI, A. G.; LUDVIGSEN, H. K.; NORN, V.; KNUDSEN, J. C.; RISBO, J.; ISPEN, R.; ANDERSEN, M. L. Stability of whippable oil-in-water emulsions: Effect of monoglycerides on crystallization of palm kernel oil. **Food Research International**, v. 54, n. 2, p. 1738-1745, 2013.
- NAJA, F.; HAMADEH, R. Nutrition amid the COVID-19 pandemic: a multi-level framework for action. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 74, n. 8, p. 1117-1121, 2020.

NASCIMENTO FILHO, E.; SILVA, N. N. B.; CONVERTI, A.; GROSSO, C. R. F.; SANTOS, A. M. P.; RIBEIRO, D. S.; MACIEL, M. I. S. Microencapsulation of acerola (*Malpighia emarginata* DC) AND ciriguela (*Spondias purpurea* L) mixed juice with different wall materials. **Food Chemistry Advances**, v. 1, p. 100046, 2022.

NISHINARI, K.; FANG, Y.; GUO, S.; PHILLIPS, G. O. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification. **Food Hydrocolloids**, v. 39, p. 301-318, 2014.

OLIVEIRA, L. S.; RUFINO, M. S.; MOURA, C. F.; CAVALCANTI, F. R.; ALVES, R. E.; MIRANDA, M. R. The influence of processing and long-term storage on the antioxidant metabolism of acerola (*Malpighia emarginata*) purée. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 23, p. 151-160, 2011.

OZCELIK, M.; AMBROS, S.; HEIGL, A.; DACHMANN, E.; KULOZIK, U. Impact of hydrocolloid addition and microwave processing condition on drying behavior of foamed raspberry puree. **Journal of Food Engineering**, v. 240, p. 83-91, 2019.

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; JANIUS, R. B.; NAWI, N. M.; ABDAN, K. Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 3, p. 599-618, 2016.

PINTO, M. R. M. R.; ALMEIDA P.D.; ALVES, A. I.; RODRIGUES, M. Z.; VIEIRA, É. N. R.; FONTES, E. A. F.; RAMOS, A. M. Encapsulation of carotenoid extracts from pequi (*Caryocar brasiliense* Camb) by emulsification (O/W) and foam-mat drying. **Powder Technology**, v. 339, p. 939-946, 2018.

PINHEIRO, R. A força eterna do amor- Teresa de Calcutá. Editora: Casa dos Espíritos; 1ª edição. 2009.

PRAKASH, A.; BASKARAN, R. Acerola, an untapped functional superfruit: a review on latest frontiers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 9, p. 3373-3384, 2018.

PRAKOTMAK, P.; SOPONRONNARIT, S.; PRACHAYAWARAKORN, S. Modelling of moisture diffusion in pores of banana foam mat using a 2-D stochastic pore network: Determination of moisture diffusion coefficient during adsorption process. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 1, p. 119-126, 2010.

PRASETYANINGRUM, A.; DJAENI, M. Drying spirulina with foam mat drying at medium temperature. **International Journal of Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 1-3, 2012.

PRIYADARSHINI, S.; RAYAGURU, K.; ROUTRAY, W.; DASH, S. K. Study of functional, biochemical, and sensory qualities of jackfruit pulp powder produced through optimized foam-mat drying parameters. **Journal of Food Science**, v. 88, n. 3, p. 926-941, 2023.

POLETTO, P.; ÁLVAREZ-RIVERA, G.; LÓPEZ, G. D.; BORGES, O. M.; MENDIOLA, J. A.; IBÁÑEZ, E.; CIFUENTES, A. Recovery of ascorbic acid, phenolic compounds and carotenoids from acerola by-products: An opportunity for their valorization. **LWT**, v. 146, p. 111654, 2021.

QADRI, O.S.; SRIVASTAVA, A.K.; YOUSUF, B. Trends in foam mat drying of foods: Special emphasis on hybrid foam mat drying technology. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 10, p. 1667-1676, 2020.

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

RITZINGER, R.; RITZINGER, C. H. S. P. Acerola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 264. P. 17-25, 2011.

SAMYOR, D.; DEKA, S. C.; DAS, A. B. Physicochemical and phytochemical properties of foam mat dried passion fruit (*Passiflora edulis Sims*) powder and comparison with fruit pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, p. 787-796, 2021.

SANKAT, C.K.; CASTAIGNE, F. Foaming and drying behaviour of ripe bananas. **LWT-Food Science and Technology**, v. 37, n. 5, p. 517-525, 2004.

SILVA, P.B.; DUARTE, C.R.E.; BARROZO, M.A.S. A novel system for drying of agroindustrial acerola (*Malpighia emarginata* DC) waste for use as bioactive compound source. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 52, p. 350-357, 2019.

SEERANGURAYAR, T.; MANICKAVASAGAN, A.; AL-ISMAILI, A. M.; AL-MULLA, Y. A. Effect of carrier agents on physicochemical properties of foam-mat freeze-dried date powder. **Drying Technology**, v. 36, n. 11, p. 1292-1303, 2018.

SORGENTINI, D. A.; WAGNER, J. R.; ANÓN, M. C. Effects of thermal treatment of soy protein isolate on the characteristics and structure-function relationship of soluble and insoluble fractions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 43, n. 9, p. 2471- 2479, 1995.

SUSANTI, D.Y.; SEDIAWAN, W.B.; FAHRURROZI, M.; HIDAYAT, M.; PUTRI, A. Encapsulation of red sorghum extract rich in proanthocyanidins: Process formulation and mechanistic model of foam-mat drying at various temperature. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, v. 164, p. 108375, 2021.

TAVARES, I. M. C.; NOGUEIRA, T. Y K.; MAURO, M. A.; GÓMEZ-ALONSO, S.; GOMES, E.; DA-SILVA, R.; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, I.; LAGO-VANZELA, E. S. Dehydration of jambolan [*Syzygium cumini* (L.)] juice during foam mat drying: Quantitative and qualitative changes of the phenolic compounds. **Food Research International**, v. 102, p. 32-42, 2017.

TIAN, H.; GUO, G.; FU, X.; YAO, Y.; YUAN, L.; XIANG, A. Fabrication, properties and applications of soy-protein-based materials: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 120, p. 475-490, 2018.

TRAN, T.; ROUSSEAU, D. Stabilization of acidic soy protein-based dispersions and emulsions by soy soluble polysaccharides. **Food Hydrocolloids**, v. 30, p. 382-392, 2013.

WAGNER J.R.; GUÉGUEN J. Surface functional properties of native, acid-treated, and reduced soy glycinin. 1. Foaming properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 1999 Jun 14;47(6):2173-80.

WANG, M.P.; CHEN, X.W; GUO, J.; YANG, J.; WANG, J.M.; YANG, X.Q. Stabilization of foam and emulsion by subcritical water-treated soy protein: Effect of aggregation state. **Food Hydrocolloids**, v. 87, p. 619-628, 2019.

XU, K.; PENG, R.; ZOU, Y.; JIANG, X.; SUN, Q.; SONG, C. Vitamin C intake and multiple health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, v. 73, n. 5, p. 588-599, 2022.

XU, M.; SHEN, C.; ZHENG, H.; XU, Y.; XUE, C.; ZHU, B.; HU, J. Metabolomic analysis of acerola cherry (*Malpighia emarginata*) fruit during ripening development via UPLC-Q-TOF and contribution to the antioxidant activity. **Food Research International**, v. 130, p. 108915, 2020.

ZANG, X.; YUE, C.; LIU, M.; ZHENG, H.; XIA, X.; YU, G. Improvement of freezethaw stability of oil-in-water emulsions prepared with modified soy protein isolates. **LWT**, v. 102, p. 122-130, 2019.

ZAYAS, J.F. Solubility of proteins. In: **Functionality of proteins in food**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997. p. 6-75.

ZHANG, M.; CHEN, H.; MUJUMDAR, A. S.; TANG, J.; MIAO, S.; WANG, Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1239-1255, 2017.

ZHOU, J.; LI, M.; BAI, Q.; DE SOUZA, T. S.; BARROW, C.; DUNSHEA, F.; SULERIA, H. A. Effects of Different Processing Methods on Pulses Phytochemicals: An Overview. **Food Reviews International**, p. 1-58, 2023.

Capítulo 2

*AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA
APLICAÇÃO DE AGENTES ESPUMANTES
VEGETAIS E DA TEMPERATURA DO AR
SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM DE
POLPA DE ACEROLA EM LEITO DE
ESPUMA E A RETENÇÃO DE
COMPOSTOS BIOATIVOS*

2 – AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE AGENTES ESPUMANTES VEGETAIS E DA TEMPERATURA DO AR SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM DE POLPA DE ACEROLA EM LEITO DE ESPUMA E A RETENÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

RESUMO

Devido à alta perecibilidade da acerola, a qual contém muitos nutrientes e é rica fonte vitamina C, processamentos que visam sua conservação e a preservação de seus nutrientes são importantes para o melhor aproveitamento dessa fruta. A secagem em leito de espuma surge como uma alternativa de conservação simples e de fácil aplicação, adequada a produtos líquidos e pastosos. Esse método exige a adição de agentes formadores de espuma, os quais, sendo de origem vegetal, poderão atender também ao público vegano, que vem crescendo rapidamente nos últimos anos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes agentes espumantes de origem vegetal e das temperaturas de secagem (60 e 70 °C) sobre a qualidade física e nutricional do pó de polpa de acerola. Para tanto, foi determinada a cinética de secagem da polpa de acerola em leito de espuma com a adição dos agentes espumantes proteína de soja (SPI), proteína de ervilha (CPP), monoglicérides destilados (D) e éster de ácido láctico de mono e diglicérides (L), a retenção dos compostos bioativos (vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos) e a alteração da cor dos pós de acerola. Os resultados demonstraram que o modelo de Page foi o que melhor representou a cinética de secagem da polpa de acerola. A secagem a 70 °C apresentou retenção de vitamina C significativamente maior que a 60 °C, resultado que foi atribuído às maiores taxas de secagem da espuma obtidas na maior temperatura, que reduziram o tempo de secagem. Compostos fenólicos totais e carotenoides também foram afetados pela temperatura, porém, em 60 °C eles foram mais preservados que a 70 °C. Os aditivos utilizados nos tratamentos afetaram significativamente a retenção de vitamina C e carotenoides, com destaque para a formulação com SPI e mistura de L e D. Em relação aos compostos fenólicos, a formulação com CPP e menor concentração de L e D apresentou melhor retenção.

Palavras-chave: Retenção de nutrientes; vitamina C; carotenoides; compostos fenólicos.

2.1 INTRODUÇÃO

Tendências recentes na indústria alimentícia mostram que os alimentos funcionais estão se tornando mais populares em todo o mundo e cada vez mais incorporados à dieta diária. Segundo Nascimento Filho et al. (2022) esse crescimento é impulsionado não apenas pela inovação na indústria de alimentos, mas também pelo aumento da conscientização do consumidor sobre sua saúde e os benefícios nutricionais dos alimentos que contêm compostos bioativos, além da mudança de estilo de vida. Uma nova tendência que recentemente vem sendo constatada é a opção por dietas vegetarianas e veganas (cujas dietas excluem totalmente o consumo de qualquer tipo de produto de origem animal), o que tem incentivado o desenvolvimento de novas formulações de alimentos como a aplicação de aditivos que atendam essas classes de consumidores (GLUSAC et al., 2018).

A acerola é conhecida por ser uma das fontes naturais com alto nível de ácido ascórbico, possuindo também outros importantes compostos bioativos, como ácidos fenólicos, antocianinas e carotenoides (MISKINIS et al., 2022). O teor de ácido ascórbico da acerola varia de acordo com as condições ambientais, variedade, grau de maturação, armazenamento e processamento, possuindo concentração cerca de 50 a 100 vezes maior que a da laranja ou do limão (PRAKASH; BASKARAN, 2018). Os frutos, após a colheita, são bastante perecíveis por possuírem alta atividade de água, além de serem propícios a sofrer danos mecânicos, enzimáticos e contaminação microbiana, sendo desejável a aplicação de métodos que melhorem a durabilidade e minimizem possíveis alterações físicas, químicas e microbiológicas (ZHANG et al., 2017).

Dentre os diversos tipos de processamento, a secagem é um procedimento amplamente utilizado pelas indústrias. Ela é uma operação unitária que se baseia na remoção parcial da água constituinte do alimento em um processo que envolve transferências de massa e de energia, na forma de calor. Existem inúmeras abordagens metodológicas que podem ser utilizadas no processo de secagem de matrizes alimentícias, onde cada tipo de secagem influencia a qualidade e as propriedades físico-químicas do produto desidratado. Porém, a escolha da técnica de secagem deve levar em consideração o tipo de alimento, os benefícios econômicos e os benefícios sobre qualidade do alimento (HARDY; JIDEANI, 2017; LEWICKI, 2006).

Dentre os diversos tipos de secagem, se encontra a secagem em leito de espuma, técnica que pode ser uma alternativa para a conservação de polpa de acerola. Ela consiste em transformar alimentos líquidos em pó, a partir da incorporação de ar à mistura da polpa com aditivos formadores de espuma e estabilizantes, para ser desidratada com ar aquecido em

secadores de bandeja e, posteriormente, moída (BEGUM et al., 2023). A estrutura da espuma proporciona altas taxas de secagem em temperaturas moderadas, o que contribui para preservar os nutrientes, consumir menos energia, reduzir o tempo de secagem, além de facilitar a reidratação dos pós devido à sua porosidade (IZADI et al., 2020).

Desse modo, a secagem em leito de espuma caracteriza-se como um processo de simples utilização, adequado à secagem de alimentos sensíveis a altas temperaturas, com alto teor de açúcar, pegajosos e viscosos, que são difíceis de secar pelos métodos tradicionais de secagem, e que possibilita boa preservação da qualidade nutricional do alimento (CARDOSO; LOBO; TEODORO, 2022). A tecnologia de secagem em leito de espuma já foi aplicada a diversos produtos alimentícios com diversos tipos de agentes espumantes, como polpa de abacaxi com utilização de leite em pó desnatado em diferentes concentrações, juntamente com amido e carboximetilcelulose (BEGUM et al., 2023), polpa de tomate com aplicação de clara de ovo, variando sua concentração (AFIFAH et al., 2022) e polpa de nectarina com albumina de ovo e carboximetilcelulose em diferentes concentrações (TEKGÜL, 2021).

Até onde se tem conhecimento, as informações contidas na literatura sobre a secagem em leito de espuma de polpa de acerola, aplicando em suas formulações aditivos ‘plant based’, são escassas. Diante disso, a proposta do presente trabalho foi investigar a secagem em leito de espuma de polpa de acerola e avaliar o efeito dos diferentes agentes espumantes de origem vegetal e da temperatura sobre a cinética de secagem e sobre a retenção de nutrientes do pó de acerola.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Material

A polpa de acerola foi adquirida no comércio local de São José do Rio Preto - São Paulo. O isolado de proteína de soja (SPI) com teor de proteína de 91,14% (base seca), foi adquirido da empresa Ecil Trading (Empreendimento Comercial e Industrial Ecil Ltda, São Paulo), assim como o concentrado da proteína de ervilha (CPP) com teor de proteína de 80% (base seca), este último gentilmente doado pela empresa. Os agentes espumantes monoglicerídeos destilados baseados em óleos vegetais (Dimodan[®], DuPont[™]) e ésteres de mono e diglicerídeos de ácidos graxos com ácido láctico, derivados de óleos vegetais naturais (Grinsted[®] Lactem, DuPont[™]) foram gentilmente doados pela DuPont – Danisco Brasil Ltda.

Os reagentes 2,6-diclorofenolindofenol, ácido ascórbico, ácido gálico, ácido oxálico, acetona, álcool etílico, bicarbonato de sódio, carbonato de sódio, éter de petróleo, Folin-Ciocalteu e sulfato de sódio foram de grau PA da marca Synth (Diadema, Brasil).

2.2.2 Preparação dos aditivos

Para a adição de SPI à polpa, preparou-se uma solução estoque aquosa com 10% de SPI (m/m), que foi aquecida a 70 °C, sob agitação magnética (200 rpm), por 20 min (KOKOSZKA et al., 2010). Para a formulação do CPP, primeiramente preparou-se uma solução estoque aquosa com concentração de 10% CPP (m/m), que foi aquecida a 80 °C, sob agitação magnética (200 rpm), por 10 min.

Os agentes tensoativos foram preparados como soluções padrão aquosas com 7% (m/m) de D e 15% (m/m) de L, mediante aquecimento sob agitação magnética (200 rpm) a 80 °C por 10 min. A porcentagem de cada substância em relação à massa total de espuma é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Formulações de cada tratamento e composição das espumas

Tratamentos	Polpa	D	L	Proteína
SPI	90%	-	-	1,00%
Lactem + Dimodan + SPI	94%	0,07%	0,15%	0,50%
Lactem + Dimodan + PEA	94%	0,07%	0,15%	0,50%
Lactem + Dimodan + PEA	93%	0,14%	0,30%	0,50%

Para a formação da espuma, as amostras de polpa pura foram misturadas com as concentrações de aditivos específicas para cada tratamento e agitadas por 20 min em uma batedeira doméstica (modelo Mondial, Premium Bella Massa Inox B-29 NP, Brasil), com uma potência de 500 W.

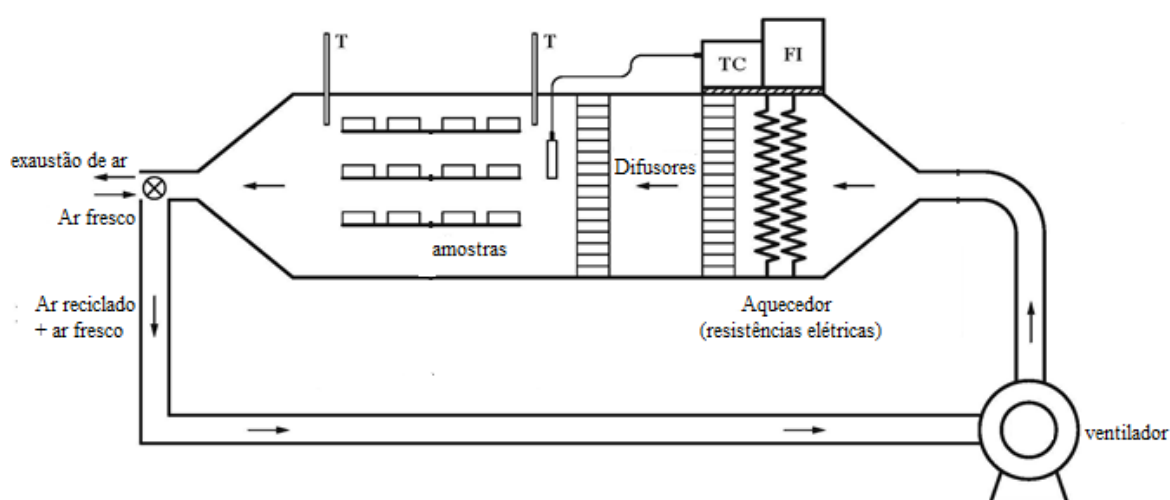
2.2.3 Procedimentos

2.2.3.1 Secagem da espuma

As espumas de acerola obtidas com os distintos emulsificantes foram submetidas ao processo de secagem utilizando ar aquecido em temperaturas de 60 e 70 °C em um secador de leito fixo (Figura 2.1) equipado com ventilador centrífugo (CV3600, Ibram, São Paulo, SP,

Brasil) com um motor 2 CV, uma câmara de secagem com uma área da seção transversal de $9,61 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, e a velocidade do ar ajustado por um inversor de frequência (ML-7.0 / 200-240, WEG, Jaguará do Sul, SC, Brasil) conectado ao motor do ventilador, de aproximadamente 1,4 m/s. Para cada tratamento, as amostras foram colocadas em bandejas de aço inox sem perfurações com $30 \times 30 \text{ cm}$ de dimensões, nas quais foram construídas com altura das bordas de 3 mm.

Figura 2.1 - Diagrama esquemático do secador. FI: inversor de frequência; TC: controlador de temperatura; S: sensor PT 100; T: termômetro; V: Válvula



Fonte: Adaptação de Molina Filho et al., (2016)

Durante o processo de secagem, as amostras foram distribuídas em 3 bandejas e pesadas em intervalos de 10 min durante a primeira hora e posteriormente a cada 15 min até atingirem a massa constante. A cada pesagem, as bandejas eram giradas em 180° e reposicionadas em nova posição vertical dentro da câmara de secagem. Essas ações foram realizadas para garantir uma secagem uniforme. Após atingir o equilíbrio, a lâmina de espuma seca era retirada com ajuda de uma espátula para posteriormente ser colocada no moinho analítico (A11, IKA, Alemanha) por 1 min.

2.2.3.2 Cinética de secagem

A secagem de espumas pode ser descrita de acordo com o período de taxa decrescente de secagem, onde a difusão líquida é o mecanismo predominante no processo (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017). Portanto, a cinética de secagem foi descrita com base no modelo de difusão, pela segunda lei de Fick apresentada numa forma modificada (Equação 2.1), que é

dada em termos de frações de massa de água sobre uma base seca, com a consideração de que a concentração de sólidos permanece constante ao longo do processo (FILIPPIN et al., 2018).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.1)$$

sendo que D_{eff} representa a difusividade efetiva da água ($m^2 \cdot s^{-1}$) e X representa o conteúdo de água médio, em base seca ($kg \text{ água} \cdot kg^{-1} \text{ matéria seca}$), em um tempo t (s).

Para determinar o coeficiente de difusividade, assume-se a geometria de placa plana infinita, com apenas uma superfície exposta ao ar de secagem, de forma que a água difunde na direção da espessura do material. Portanto, considerando-se que a migração da água ocorre apenas na direção z , que a água está uniformemente distribuída na espuma no momento inicial e que a resistência externa à transferência de água é insignificante, a Equação (2.1) estará sujeita às seguintes condições:

$$t = 0, \text{ para todo } z, X = X_0 \quad (2.2)$$

$$t = 0, z = 0, \left. \frac{\partial X}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (2.3)$$

$$t > 0, z = L, X = X_\infty \quad (2.4)$$

sendo que X_0 e X_∞ representam o conteúdo de água, em base seca ($kg \text{ água} \cdot kg^{-1} \text{ matéria seca}$), no equilíbrio e no instante inicial, respectivamente, e L é a espessura inicial da placa (m) que é exposta ao ar de secagem em apenas uma das faces.

O coeficiente de difusão efetivo foi considerado constante, e os efeitos do gradiente de temperatura sobre a transferência de massa, negligenciados (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017). Para avaliar a difusão da água durante a secagem, foi utilizada a solução analítica da equação de Fick para a geometria de placa plana infinita, integrada sobre a espessura, com aproximação de doze termos da série (Eq. 2.5), a qual foi ajustada aos dados experimentais de secagem da polpa de acerola em leito de espuma.

$$RX = \frac{\bar{X} - X_{\infty}}{X_0 - X_{\infty}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^n \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right] \quad (2.5)$$

sendo que RX representa, a razão de conteúdo de água, adimensional, \bar{X} representa o conteúdo de água médio, em base seca ($\text{kg água} \cdot \text{kg}^{-1}$ matéria seca), em um tempo t (s), L é a espessura inicial da placa (m) e n é o número de termos da série. Apesar da Equação (2.5) ser aplicável a sólidos com geometria simples e constante ao longo do processo, utilizou-se um método aproximado que incorpora o encolhimento do sólido ao modelo. Para isso, a espessura L foi descrita como uma função linear do conteúdo de água. A incorporação da espessura variável na solução analítica integrada tem se mostrado adequada para diminuir as discrepâncias que resultam da consideração de uma espessura constante, quando o material é altamente deformável (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017; FILIPPIN et al., 2018).

2.2.3.3 Taxa de secagem

A taxa de secagem foi calculada de acordo com a Equação (2.2):

$$\dot{E} = \frac{m_s \Delta X}{\Delta t} \quad (2.2)$$

sendo que:

\dot{E} representa a taxa de secagem ($\text{kg água} \cdot \text{s}^{-1}$);

m_s é a massa de sólidos secos (kg matéria seca);

$\Delta X / \Delta t$ é a variação de umidade com o tempo ($\text{kg água} \cdot \text{kg}^{-1}$ matéria seca $\cdot \text{s}^{-1}$).

2.2.3.4 Modelos matemáticos empíricos para descrever a cinética de secagem

Os modelos matemáticos empíricos de Newton, de Page e de Henderson-Pabis (CANIZARES; MAURO, 2015) também foram ajustados aos dados experimentais obtidos no processo de secagem da polpa de acerola com diferentes tratamentos, para descrever a cinética de secagem (Tabela 2.2). Esses modelos são úteis para descrever a cinética de secagem para o caso das condições de secagem e das dimensões das amostras serem similares às aquelas utilizadas

durante a determinação das constantes das equações (CANIZARES; MAURO, 2015, KIM; TANAKA; TANAKA, 2021; MOLINA-FILHO et al., 2016).

Tabela 2.2 – Modelos matemáticos empíricos aplicados à cinética de secagem em leito de espuma da polpa de acerola

Designação do modelo	Modelo	
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(2.3)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(2.4)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson - Pabis	(2.5)

em que:

t : tempo de secagem (s);

k : parâmetro de velocidade do modelo sendo que Newton e Henderson-Pabis (s^{-1}) e de Page (s^{-n})

a, n : constantes de ajuste dos modelos (adimensional);

RX : razão de conteúdo de água (adimensional).

2.2.3.5 Densidade da espuma

As densidades foram medidas através da determinação de massas e volumes, utilizando picnômetros de 10 mL com termômetro, previamente calibrados com água destilada, conforme Thuwapanichayanan et al. (2008). A equação (2.6) descreve a densidade das soluções antes e depois da formação da espuma.

$$\rho_k = \frac{m_k}{V} \quad (2.6)$$

na qual ρ_k representa a densidade de k (g/cm^3); m_k representa a massa de k (g); o subíndice k representa solução (antes do batimento) ou espuma (após o batimento); V representa volume (cm^3).

2.2.3.6 Percentual de expansão ou *overrun*

O percentual de expansão ou *overrun* de cada formulação foi calculado a partir dos valores de densidade das polpas misturadas com os aditivos, antes do batimento, e de densidade das suas respectivas espumas (COELHO et al., 2019).

$$\text{Exp (\%)} = \frac{\frac{1}{\rho_{\text{esp}}} - \frac{1}{\rho_{\text{sol}}}}{\frac{1}{\rho_{\text{sol}}}} \times 100 \quad (2.7)$$

na qual Exp representa a expansão da espuma (%), ρ_{sol} é a densidade da solução antes do batimento ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e ρ_{esp} é a densidade da espuma ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

2.2.4 Metodologia Analítica

As análises empregadas neste estudo incluíram a determinação de teor de água e atividade de água, análise da cor, teor de vitamina C, teor de carotenoides e teor de compostos fenólicos em amostras de polpa de acerola, antes da secagem, e em amostras na forma de pó, após as etapas de secagem. A polpa de acerola pura também foi analisada quanto a cinzas, conforme a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (1985). Seu pH foi determinado em pHmetro da marca Tecnopon (MPA 210, São Paulo, Brasil) e a determinação de sólidos solúveis totais (°Brix) foi realizada por leitura direta em refratômetro digital (HANNA, HI96804, Brasil). Essas análises permitiram avaliar a qualidade e as propriedades nutricionais do produto acabado e verificar o efeito das condições de secagem empregadas e das formulações de espuma utilizadas sobre a preservação dos compostos bioativos presentes na polpa de acerola.

2.2.4.1 Sólidos totais

O teor de sólidos totais foi determinado em triplicata, por método gravimétrico, no qual as amostras foram secadas em estufa a vácuo (TE-395, Tecnal, Brasil), a 60 °C e 10 kPa, até atingir peso constante (AOAC, 1995).

2.2.4.2 Atividade de água

A atividade de água das amostras foi determinada em triplicata, utilizando um analisador de atividade de água (Aqualab 4TEV, Decagon-Meter, EUA), utilizando o sensor de ponto de orvalho

2.2.4.3 Cor

As análises de cor foram realizadas em quadruplicata, utilizando espectrofotômetro de bancada (ColorFlex45/0, HunterLab, Estados Unidos) e versão 4.10 do software Universal, com as seguintes configurações: iluminante D65, observador a 10°. Cada amostra foi medida em quatro posições, nos ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°. Foi utilizado o sistema CIE $L^*a^*b^*$, definido pela Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), através das coordenadas retangulares no espaço de cor L^* , a^* e b^* e também no espaço CIE L^*C^*h , este em coordenadas esféricas, calculando-se croma (C^*), que expressa o grau de intensidade ou saturação da cor (Equação 2.8), assim como o ângulo hue (h), que representa a tonalidade da cor (Equação 2.9) e a diferença total de cor (ΔE) (Equação 2.10), na qual os parâmetros medidos nos pós foram comparados com aqueles medidos na polpa pura (PATHARE et al., 2013).

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.8)$$

$$h = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (2.9)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^{*'})^2 + (a^* - a^{*'})^2 + (b^* - b^{*'})^2} \quad (2.10)$$

em que $L^{*'}$, $a^{*'}$, $b^{*'}$ se referem aos parâmetros de cor da polpa de acerola pura.

2.2.4.4 Vitamina C

A determinação do conteúdo de vitamina C foi realizada, utilizando o método descrito na AOAC (1984) modificado por Benassi e Antunes (1988). Os resultados foram expressos em mg de vitamina C/ 100g de matéria seca.

2.2.4.5 Carotenoides

Os teores totais de carotenoides foram determinados por meio de metodologia descrita por Rodriguez-Amaya e Kimura (2004), que consistiu na leitura da absorção de luz em um espectrofotômetro (GENESYS 10S UVVIS, Thermo Scientific, EUA) em um comprimento de onda de 450 nm (β -caroteno). O conteúdo de carotenoides totais (CCT) das amostras, em $\mu\text{g/g}$ de matéria seca, foi expresso como β -caroteno e calculado conforme a Equação 2.11.

$$\text{CCT } (\mu\text{g} / \text{g matéria seca}) = \frac{A \times \text{volume (mL)} \times 10^4}{A_{1\text{cm}}^{1\%} \times \text{massa da amostra (g matéria seca)}} \quad (2.11)$$

em que A é absorbância; volume representa o volume total do extrato (25 mL) e $A_{1\text{cm}}^{1\%}$ é o coeficiente de absorvidade do β -caroteno em éter de petróleo (2592).

2.2.4.6 Compostos Fenólicos Totais (CFT)

Os extratos para a determinação dos CFT foram preparados a partir de 1,2g de polpa ou 0,09g do pó de acerola com 5 mL de álcool etílico (80%). A mistura foi homogeneizada em Turrax (T25 digital, IKA, Alemanha) e colocada em banho ultrassom (Q3.0/40A, Ultronique, Brasil) por 15 min. Em seguida, ela foi centrifugada (Z326K, Hermle, Alemanha) a 4 °C e 6000 rpm por 20 min. Foram realizadas duas extrações sucessivas e os sobrenadantes dessas extrações foram combinados e colocados em frascos de vidro âmbar (MARIANO-NASSER et al., 2017).

Os CFT foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu, de acordo com a metodologia descrita por Asami et al. (2003). A absorbância foi lida a 765 nm, em espectrofotômetro (GENESYS 10S UVVIS, Thermo Scientific, EUA). Os CFT foram quantificados usando curva de calibração preparada com solução padrão de ácido gálico. Os resultados foram expressos em equivalente de ácido gálico (EAG) (miligramas de ácido gálico/g de matéria seca).

2.2.4.7 Retenção

A retenção de vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos totais durante o processo de preparação e de secagem das espumas foi calculada de acordo com a Equação (2.12) (AMADO; SILVA; MAURO, 2020):

$$\text{Ret}(\%) = \frac{C_f}{C_i} \times 100 \quad (2.12)$$

em que Ret é a retenção da substância k (vitamina C, carotenoides ou CFT) durante o processo, C_f é o seu conteúdo final nas amostras, após o processo e C_i , o seu conteúdo inicial, antes do processo, ambos expressos em relação ao conteúdo de matéria seca das amostras.

2.2.5 Análise estatística

Os dados foram obtidos em triplicata e avaliados estatisticamente através do método de Análise de Variância (ANOVA), seguindo-se a aplicação do teste de Tukey para comparação das médias, ao nível de 5 % de significância.

Com base no algoritmo Levenberg–Marquardt utilizado na estimação dos parâmetros de modelos não lineares pelo método dos mínimos quadrados, os coeficientes de difusão foram determinados de acordo com o ajuste da Eq. (2.1) aos dados experimentais (MARQUART, 1963) e raiz do quadrado médio do erro (RQME) (HODSON, 2022).

$$\text{RQME} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (Y - \hat{Y})^2} \quad (2.13)$$

em que n é o número de dados obtidos, Y representa o valor observado experimentalmente e \hat{Y} , o valor estimado pelo modelo.

A eficiência dos ajustes dos modelos matemáticos foi avaliada com base na magnitude do coeficiente de determinação (R^2) e no erro padrão médio estimado (SE) (CELIA et al., 2023), com intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$) (Equação 2.14).

$$\text{SE} = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n - \text{DF}}} \quad (2.14)$$

em que Y representa o valor observado experimentalmente, \hat{Y} , o valor estimado pelo modelo, e DF, o número de graus de liberdade do modelo (calculado como o número de coeficientes de regressão do modelo subtraído do número de observações n).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização físico-química da polpa de acerola

As polpas de acerola utilizadas nos ensaios foram caracterizadas quanto a sua umidade, °Brix, pH, cor, vitamina C, carotenoides e compostos fenólicos totais, cujos valores médios são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Média e desvio-padrão (DP) de parâmetros físicos e químicos determinados na polpa de acerola

Parâmetros	Média ± DP
Umidade (g/100g) ⁽¹⁾	92,69 ± 0,02
pH	3,49 ± 0,02
Sólidos solúveis totais (°Brix)	7,13 ± 0,05
Cor	
L*	46,33 ± 1,53
a*	25,84 ± 0,20
b*	37,44 ± 0,75
C*	45,50 ± 0,71
h	55,39 ± 0,39
Conteúdo de cinzas (g/100g) ⁽¹⁾	0,27 ± 0,01
Vitamina C (mg/100g) ⁽¹⁾	1341,62 ± 182,25
Carotenoides (µg/g) ⁽¹⁾	6,19 ± 0,26
Compostos fenólicos totais (mg EAG/100g) ⁽¹⁾	1314,00 ± 42,08

⁽¹⁾ valores de composição estão apresentados em base úmida

Com base na legislação brasileira, instrução normativa n°37 de 1 de outubro de 2018, na qual estabelece os parâmetros analíticos de suco e de polpa de fruta e demais quesitos complementares aos padrões de identidade e qualidade já fixados pelo Ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (BRASIL, 2018), os valores dos parâmetros de sólidos solúveis, pH e vitamina C encontrados na polpa de acerola em estudo se encontraram acima do mínimo exigido no regulamento técnico para fixação dos padrões de identidade e qualidade para a polpa de acerola.

2.3.2 Propriedades da espuma

As propriedades da espuma são essenciais para escolher os melhores tratamentos para a realização da secagem em leito de espuma da polpa de acerola. Podem ser encontradas na Tabela 2.4 a densidade e o *overrun*, este último significando a porcentagem de expansão da espuma, de acordo com a Eq.2.7.

Tabela 2.4 – Características da espuma da polpa de acerola com diferentes agentes espumantes

Tratamentos	ρ_{esp} (g/cm ³)	Overrun (%)
Polpa pura	0,828±0,036 ^a	17,4±4,9 ^d
1% SPI	0,605±0,023 ^b	40,7±1,9 ^c
0,07% D + 0,15% L e 0,5% SPI	0,282±0,004 ^c	72,0±0,3 ^b
0,07% D + 0,15% L e 0,5% CPP	0,228±0,010 ^d	77,7±1,1 ^b
0,14% D + 0,30% L e 0,5% CPP	0,148±0,007 ^e	84,6±0,7 ^a

Letras diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre os tratamentos.

A polpa de acerola fresca não exibiu capacidade de formação espuma sem agentes espumantes, sendo necessária a adição de aditivos para obtenção de uma espuma estável, com maior *overrun* e menor densidade. Abd El-Salam et al. (2021) explica que alguns alimentos necessitam da adição de agentes espumantes para a formação de espuma devido à composição e às propriedades associadas à matriz dos alimentos.

Neste estudo, a densidade da espuma de polpa de acerola com agentes espumantes variou de 0,15 a 0,61 g·cm⁻³, se aproximando dos valores recomendados por Van Arsdel e Copley (1964), autores que estabeleceram que a densidade da espuma deve estar entre 0,1 e 0,6 g·cm⁻³. A densidade da espuma é um parâmetro importante que influencia o processo de secagem, bem como as propriedades do produto final, pois espumas que possuem baixa densidade, têm alta quantidade de ar aprisionado dentro da estrutura da espuma. Neste sentido, essa estrutura pode ajudar a acelerar o movimento de remoção de água durante a secagem em leito de espuma, pois proporciona uma maior área de superfície para a secagem (DEHGHANNYA et al., 2018; NG e SULAIMAN, 2018).

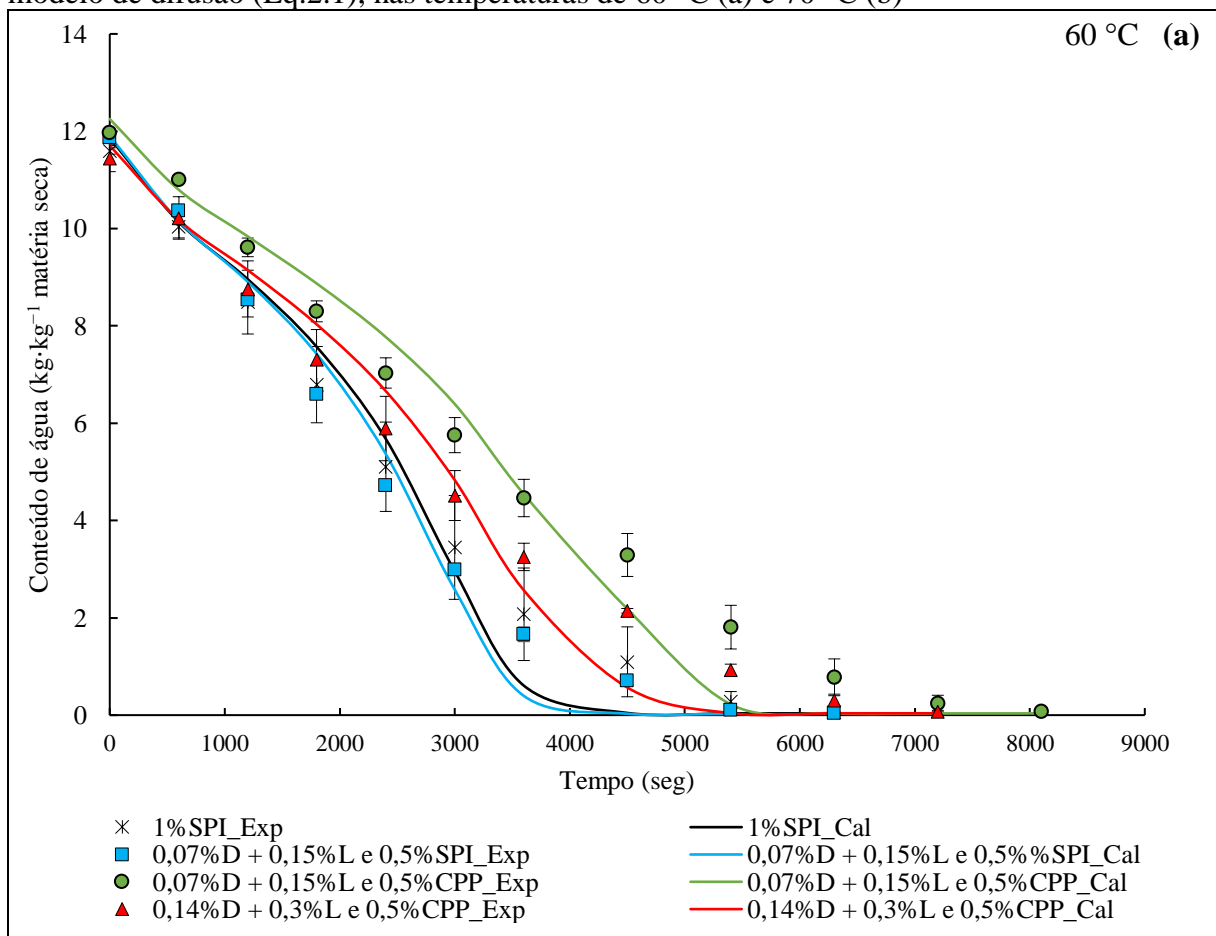
Quando se compara a mesma formulação de agentes espumantes modificando apenas as proteínas, observa-se que a espuma contendo CPP possui características ligeiramente superiores à com SPI, isto é, densidade inferior e maior *overrun*. Esses resultados são consistentes com os reportados por Brar et al., (2020) em estudo sobre secagem em leito de espuma de pêssego, utilizando como agentes espumantes isolado da proteína de soja e ervilha misturados a carboximetilcelulose.

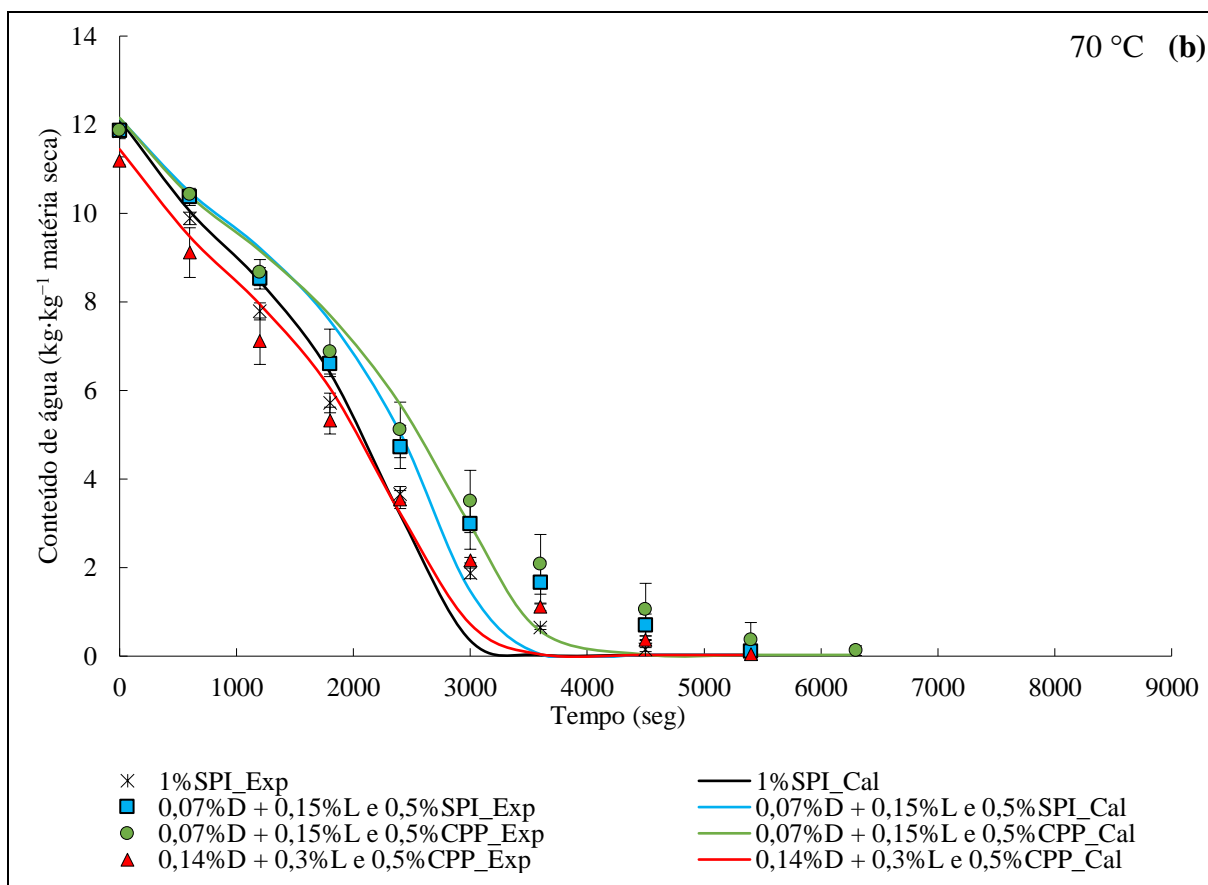
Percebe-se que a densidade da espuma reduziu significativamente com o aumento da concentração dos aditivos L e D nas espumas com CPP. De acordo com Karim & Wai (1999), o aumento da concentração de agentes espumantes reduz a tensão superficial, devido ao movimento destes aditivos da fase aquosa para a interface ar-líquido, logo aumenta a capacidade de formação de espuma e à redução da densidade.

2.3.3 Difusão

A Figura 2.2 ilustra a cinética de secagem, onde compara o valor do conteúdo de água medido experimentalmente e os valores calculados de acordo com o modelo de difusão (Eq.2.1), em função do tempo de secagem, da polpa de acerola submetida aos diferentes tratamentos.

Figura 2.2 – Cinética de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de difusão (Eq.2.1), nas temperaturas de 60 °C (a) e 70 °C (b)



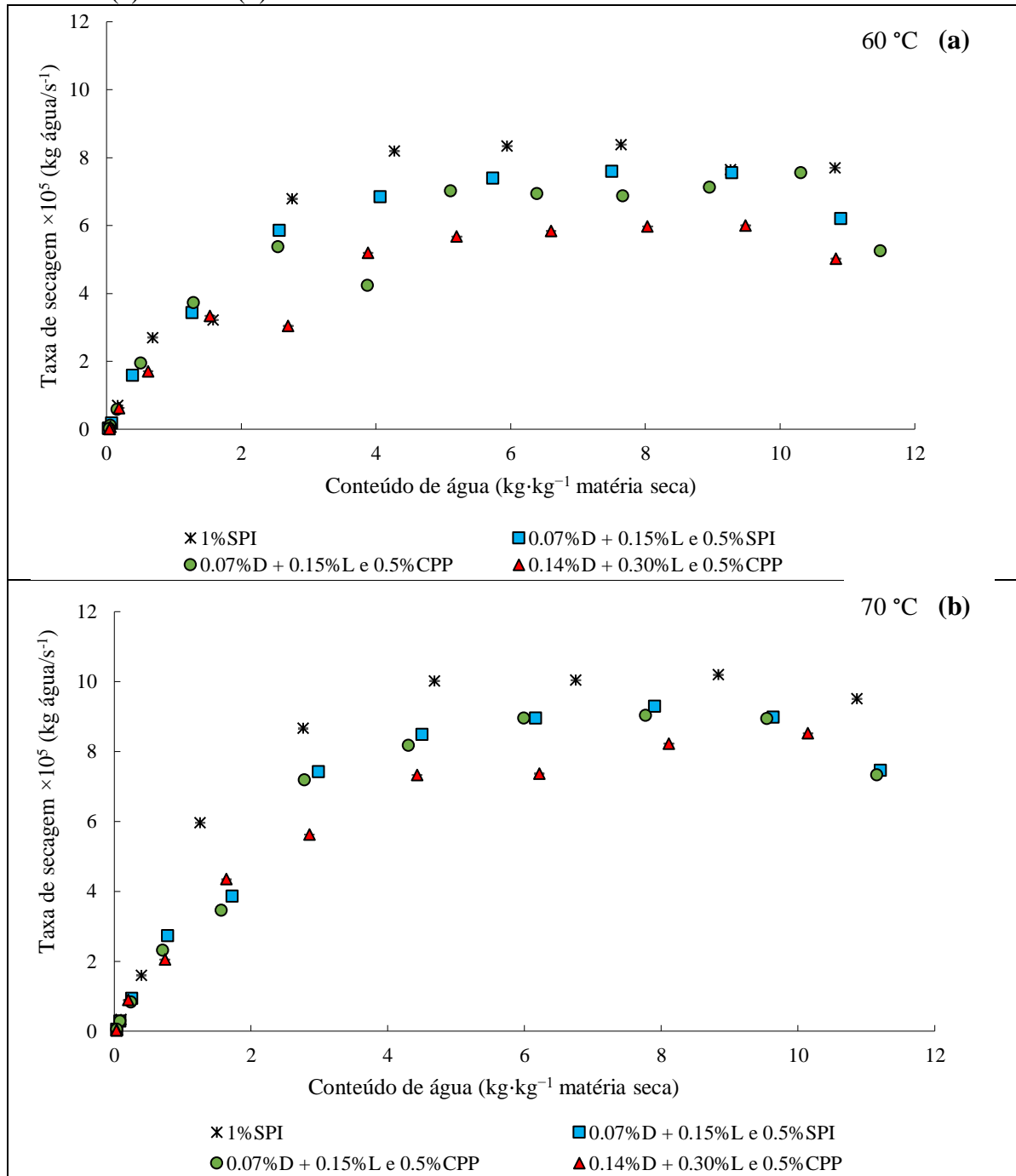


Sendo L=Lactem; D=Dimodan[®]; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado de proteína de ervilha

Fonte: Elaborado pelo autor

No início do processo de secagem com ar quente, o teor inicial de umidade das espumas de acerola era alto, mas caiu rapidamente para todas as espumas, uma vez que a estrutura das espumas é favorável a altas taxas de secagem. A 60 °C (Figura 2.2a), constata-se que são necessárias mais de duas horas para que as amostras atinjam níveis de umidade próximos do equilíbrio. A 70 °C (Figura 2.2b), constata-se redução considerável do tempo de secagem para atingir um mesmo teor de umidade, uma vez que temperatura de secagem mais alta aumentou a taxa de secagem, como pode-se observar na Figura 2.3, onde as taxas a 60 °C (Figura 2.3a) atingem seus maiores níveis em valores inferiores aos das taxas a 70 °C.

Figura 2.3 – Taxa de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de difusão (Eq.2.1), em função do conteúdo de água ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ matéria seca.), nas temperaturas de 60 °C (a) e 70 °C (b)



L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado de proteína de ervilha.
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 2.3, as taxas de secagem, em ambas as temperaturas, apresentaram, no início da operação, valores ligeiramente crescentes devido à adaptação da amostra à temperatura do secador. Elas rapidamente atingiram seus valores mais altos na faixa de umidade elevada das espumas. As taxas medidas nas secagens a 60 °C apresentaram alguma estabilidade até

atingirem umidades entre 5 e 6 kg água/kg matéria seca, o que corresponde a períodos de 30 ou 40 min a partir do início da secagem, sugerindo período de secagem a taxa constante. A 70 °C, esse período foi menor, sendo que a umidade atingiu valores entre 5 e 6 kg água/kg matéria seca em aproximadamente 30 min de secagem. Além disso, período de taxa constante não foi evidenciado na mistura que continha CPP e a maior quantidade de L e D. A partir desse período, conforme a umidade diminuiu, constatou-se também uma queda da taxa de secagem. A taxa de secagem inicial elevada é devido ao alto teor de água presente na espuma, mas conforme a secagem avança, o gradiente de concentração de água diminui, reduzindo a transferência de água, com consequente diminuição da taxa de remoção de água (TEKGÜL, 2021). Cól et al. (2021) apontam que maiores taxas se devem às maiores áreas de superfície para evaporação da água e à porosidade da espuma, facilitando o movimento da água. As taxas de secagem foram mais altas na temperatura de 70 °C, uma vez que esse comportamento está relacionado a uma evaporação mais rápida nas maiores temperaturas, que estimula a difusão da água do interior para fora do sólido (KUMAR et al., 2022).

A formação de espaço poroso na espuma aumenta a área superficial, o que facilita o processo de difusão da umidade durante a secagem (AZIZPOUR et al., 2014). Abd Karim e Wai (1999) ressaltam que, devido à estrutura da espuma, o líquido pode se movimentar mais facilmente em razão da ação capilar ao longo dos interstícios, auxiliando na secagem mais rápida. Chaux-Gutiérrez et al. (2017) complementam, afirmando que a estrutura porosa aumenta a área de superfície de contato entre o material e o ar de secagem, resultando em maior transferência de calor e massa, o que proporciona diminuição na duração da secagem.

Tabela 2.5 – Coeficientes de difusão efetiva de água determinados em secagem em leito de espuma de polpa de acerola (Equação (2.1)) atividade de água e teor de água ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ amostra), antes e após a secagem

Tratamentos	$D_{\text{eff}} \times 10^{10}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	RQME	R^2	Atividade de água		Teor de água	
				(média \pm desvio padrão)		(média \pm desvio padrão)	
				<i>antes da secagem</i>	<i>após a secagem</i>	<i>antes da secagem</i>	<i>após a secagem</i>
1%SPI_60 °C	1,92 \pm 0,26	0,027	0,976	0,9874 \pm 0,002 ^{aA}	0,2451 \pm 0,01 ^{aA}	91,94 \pm 1,11 ^{aA}	3,54 \pm 0,33 ^{aA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_60 °C	1,95 \pm 0,05	0,022	0,977	0,9749 \pm 0,003 ^{bB}	0,1972 \pm 0,01 ^{bA}	91,75 \pm 0,85 ^{aA}	2,83 \pm 0,20 ^{aA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_60°C	1,46 \pm 0,07	0,031	0,976	0,9796 \pm 0,003 ^{bA}	0,2183 \pm 0,04 ^{abA}	91,92 \pm 0,61 ^{aA}	3,50 \pm 1,17 ^{aA}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_60°C	1,64 \pm 0,07	0,026	0,974	0,9789 \pm 0,004 ^{bA}	0,2386 \pm 0,02 ^{abA}	93,38 \pm 0,44 ^{aA}	3,80 \pm 1,17 ^{aA}
1%SPI_70 °C	2,38 \pm 0,05	0,024	0,979	0,9878 \pm 0,001 ^{aA}	0,1967 \pm 0,05 ^{aB}	92,32 \pm 0,41 ^{aA}	2,57 \pm 0,74 ^{aA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_70 °C	2,00 \pm 0,10	0,039	0,976	0,9824 \pm 0,007 ^{abA}	0,2118 \pm 0,05 ^{aA}	92,24 \pm 0,64 ^{aA}	2,83 \pm 0,41 ^{aA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_70°C	1,92 \pm 0,18	0,034	0,973	0,9763 \pm 0,006 ^{bcA}	0,1825 \pm 0,03 ^{aA}	92,24 \pm 2,50 ^{aA}	2,79 \pm 0,05 ^{aA}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_70°C	2,32 \pm 0,09	0,027	0,967	0,9709 \pm 0,004 ^{cB}	0,1863 \pm 0,01 ^{aB}	91,44 \pm 0,95 ^{aA}	2,65 \pm 0,28 ^{aA}

Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras da mesma temperatura de acordo com teste de Tukey e letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

A difusividade efetiva de umidade (D_{eff}), que caracteriza as propriedades de transferência de massa do material, envolve o movimento interno de umidade. Os valores obtidos a partir da Eq. (2.1) estão dentro da faixa geral de $10^{-11} - 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para materiais alimentícios (ZOGZAS et al., 1996). Os coeficientes de difusão determinados para os diferentes tratamentos da polpa de acerola foram encontrados numa faixa entre $1,46 \times 10^{-10}$ e $2,38 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo que suas médias não apresentaram diferença significativa entre as amostras secadas a uma mesma temperatura e entre amostras de mesma composição, nas duas temperaturas.

Apesar de se reconhecer que os coeficientes de difusão são similares, a eficiência do ajuste do modelo de difusão aos dados experimentais não foi boa. Constatam-se resíduos altos entre os valores observados e preditos (Figura 2.2), o que pode estar relacionado ao período de taxa constante observado em quase todas as secagens, o qual chegou a representar quase um terço do tempo de algumas secagens. Geralmente esse período é negligenciado em secagem de alimentos, inclusive em secagem de espumas (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017), por não ser detectável ou ser pouco significativo sobre o tempo total de secagem. Chaux-Gutiérrez et al. (2017), que secaram espumas de polpa de manga, obtiveram ajustes do modelo de difusão superiores aos obtidos na presente pesquisa, boa proximidade entre os valores observados e os preditos pelo modelo. A polpa de manga continha teor de água bem inferior ao da polpa de acerola, assim como as espumas, o que explicaria a presença de período de taxa constante na secagem da espuma de polpa de acerola.

Também merece destaque o fato de que a densidade das espumas de cada formulação apresentou diferenças importantes em si dados apresentados na Tabela 2.4, porém, não foi possível relacioná-las com a eficiência da secagem, uma vez que os aditivos apresentam diferentes interações com a água. Por exemplo, a formulação composta apenas por SPI resultou na espuma de maior densidade e nas taxas de secagem mais elevadas.

O termo “atividade de água” é utilizado para descrever a intensidade com a qual a água se associa a constituintes não aquosos em alimentos. A atividade de água é um parâmetro crítico que está diretamente relacionado à quantidade de água disponível para o crescimento microbiano e reações de degradação, tornando-se um indicador importante de estabilidade e segurança microbiana. (DAMODARAN; PARKIN, 2018).

No estudo em questão, verificou-se que os pós de acerola apresentaram uma variação na atividade de água entre 0,1825 e 0,2451. Ao analisar os efeitos da temperatura

sobre diferentes tratamentos, observou-se que as formulações contendo CPP e quantidades mais elevadas de aditivos L e D, bem como aquelas que continham apenas SPI, apresentaram uma diferença significativa a 70 °C, resultando em uma atividade de água mais baixa, o que se explica pelos menores conteúdos de água no equilíbrio quando as espumas são secadas em umidades relativas mais baixas. Quando se compararam as amostras com base na composição dos aditivos, verifica-se que as amostras que continham SPI em suas formulações e que foram submetidas a 60 °C também apresentaram diferenças significativas entre si.

Foi constatado que o teor de água do pó de acerola sofreu uma redução significativa durante o processo de secagem, porém, não foi observada nenhuma diferença significativa entre os valores determinados antes da secagem, assim como aqueles determinados após a secagem.

2.3.4 Modelos matemáticos empíricos para descrever a cinética de secagem

Modelos empíricos de secagem em camada fina (Newton, Page, Henderson-Pabis, Eq. (2.3), (2.4) e (2.5)) foram ajustados aos resultados experimentais, e os parâmetros de ajuste são apresentados na Tabela 2.6. Os parâmetros dos modelos foram determinados a partir de valores experimentais médios, obtidos a partir das secagens realizadas em duplicata.

Tabela 2.6 – Parâmetros de ajuste dos diferentes modelos de secagem em camada fina para secagem em leito de espuma de polpa de acerola

Tratamentos	Newton			Page				Henderson – Pabis			
	$k \times 10^4$ (s ⁻¹)	SE $\times 10^2$	R ²	$k \times 10^6$ (s ⁻ⁿ)	n	SE $\times 10^2$	R ²	$k \times 10^4$ (s ⁻¹)	a	SE $\times 10^2$	R ²
1% SPI – 60°C	3,98	7,41	0,959	4,42	1,57	1,88	0,998	4,31	1,09	6,90	0,968
0,07% D + 0,15% L e 0,5% SPI – 60°C	4,13	8,03	0,953	3,33	1,61	1,93	0,998	4,49	1,09	7,51	0,963
0,07% D + 0,15% L e 0,5% CPP – 60°C	2,89	7,98	0,955	3,24	1,55	2,33	0,997	3,18	1,10	7,21	0,966
0,14% D + 0,30% L e 0,5% CPP – 60°C	3,37	7,29	0,961	5,44	1,51	1,84	0,998	3,66	1,09	6,65	0,971
1% SPI – 70°C	5,08	7,68	0,957	4,09	1,62	2,33	0,996	5,45	1,08	7,38	0,964
0,07% D + 0,15% L e 0,5% SPI – 70°C	4,26	7,99	0,954	3,12	1,63	1,58	0,998	4,63	1,09	7,46	0,964
0,07% D + 0,15% L e 0,5% CPP – 70°C	3,98	7,55	0,957	4,48	1,57	1,44	0,999	4,32	1,09	6,99	0,967
0,14% D + 0,30% L e 0,5% CPP – 70°C	4,95	6,23	0,970	16,63	1,44	2,00	0,997	5,24	1,06	6,02	0,975

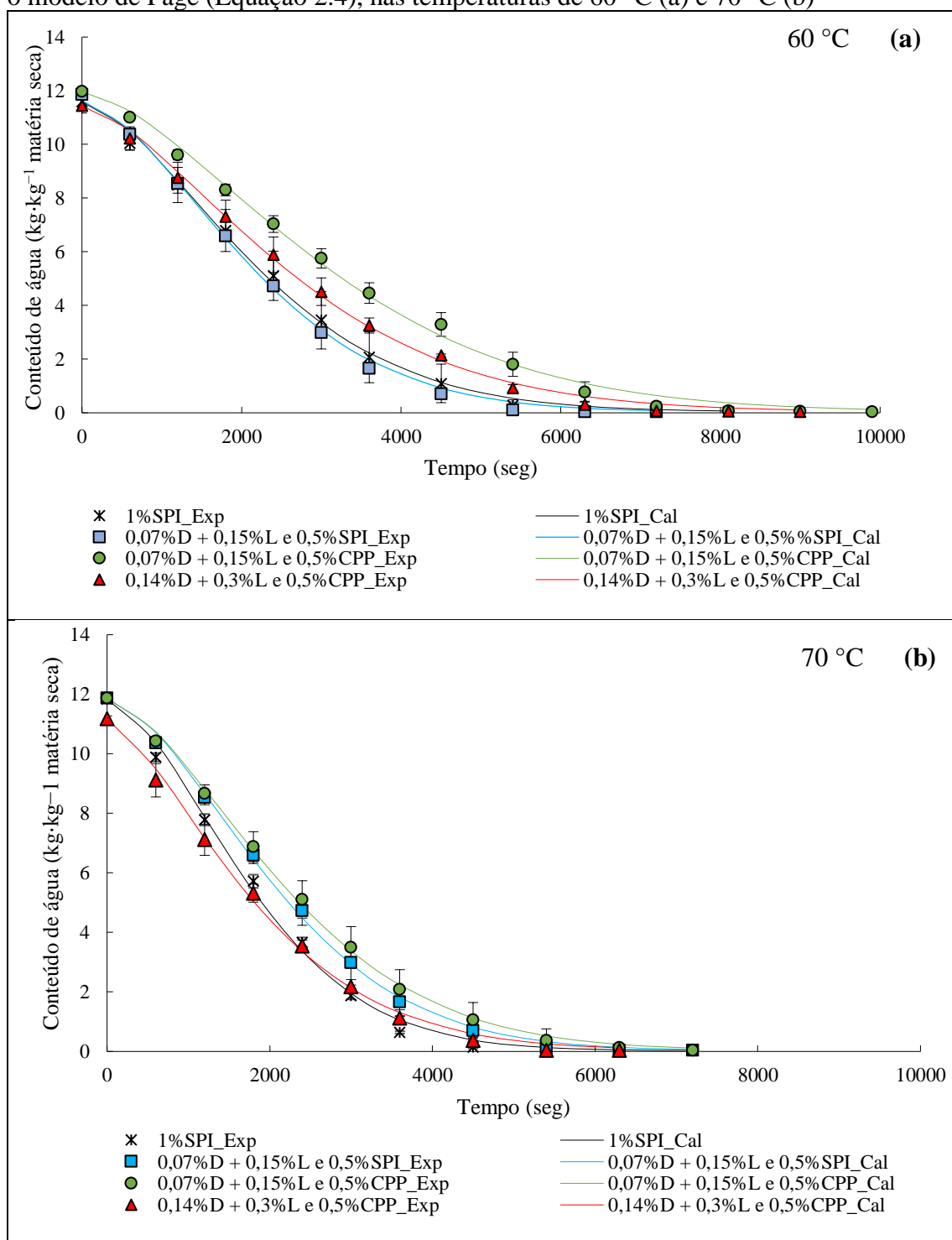
Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Os coeficientes de ajuste dos modelos matemáticos: a e n são adimensionais.

Esses modelos empíricos têm sido amplamente utilizados para descrever secagem em leito de espuma de frutas, vegetais e outros materiais alimentícios (KUMAR et al., 2022; DIÓGENES et al., 2022). Os resultados demonstram que os modelos apresentam bons ajustes aos dados experimentais, sendo que o de Page apresentou o maior R² e o

menor erro médio estimado em todos os tratamentos. Portanto, o modelo selecionado para descrever a cinética de secagem em leito de espuma da polpa de acerola foi o de Page. Esse resultado está de acordo com o obtido por Araújo et al. (2017), para secagem em leito de espuma de polpa de acerola, com utilização dos aditivos Albumina e Emustab[®], e temperaturas de secagem de 50 a 70 °C. Reis, Moraes, Masson (2021), em artigo de revisão, também destacam que o modelo matemático de Page tem sido o mais apropriado para descrever a cinética de secagem em leito de espuma.

Como pode ser observado na Figura 2.3a e 2.3b, que compara o conteúdo de água observado e predito pelo modelo de Page, constata-se que o ajuste do modelo foi eficiente, com grande proximidade entre os valores experimentais e calculados, em todos os tratamentos. Simpson et al. (2017) demonstram que o sucesso da equação de Page pode ser explicado por sua similaridade matemática com a solução de um fenômeno de difusão anômalo. Para isso, eles aplicaram cálculo fracionário à segunda lei de Fick, com derivada de ordem fracionária no tempo, e, para longos tempos de secagem, encontraram similaridade com o modelo de Page, que neste caso, teria uma explicação fenomenológica. Os autores testaram o modelo em diversos experimentos, concluindo que, a constante K estaria relacionada à geometria e o coeficiente n ao tipo de difusão e à microestrutura do alimento, devendo, por essa razão, ser constante com a temperatura. Ainda, quando aplicável, o expoente $n > 1$ representa comportamento superdifusivo e $n < 1$, subdifusivo. No presente estudo, ainda que nem todos os índices tenham apresentado constância com a temperatura, a maioria foi próxima e todos os valores foram maiores que a unidade, o que caracterizaria uma difusão anômala com comportamento superdifusivo. Tendências semelhantes foram encontradas em secagem de polpa de abacaxi em leito de espuma, para a qual os autores atribuem a superdifusão ao movimento ativo das moléculas de água da interface ar-líquido da polpa espumada (BEGUM et al., 2023).

Figura 2.4 – Cinética de secagem em leito de espuma de polpa de acerola, de acordo com o modelo de Page (Equação 2.4), nas temperaturas de 60 °C (a) e 70 °C (b)



L=Lactem; D=Dimodan[®]; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado de proteína de ervilha.

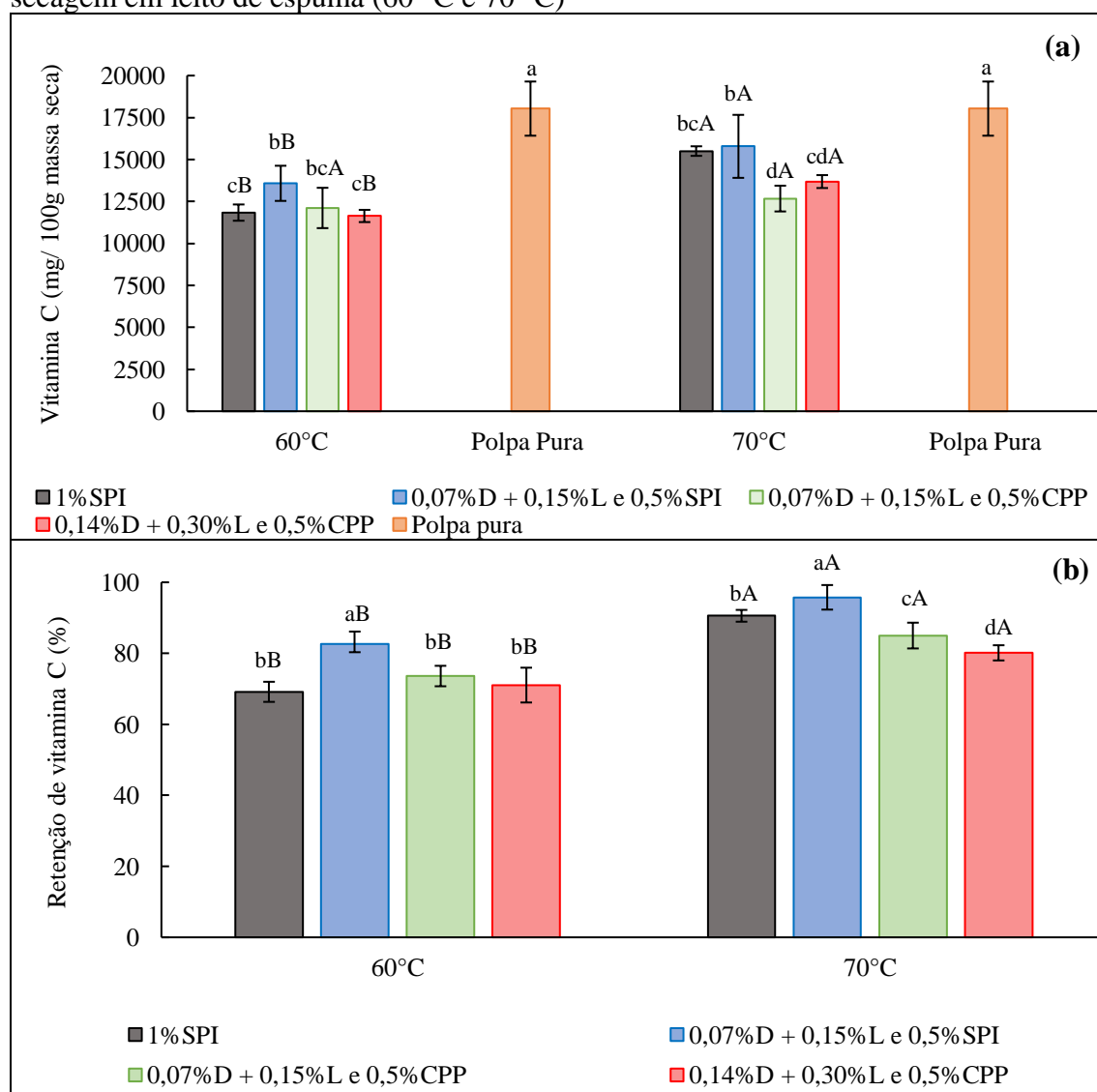
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.5 Vitamina C

Neste estudo, foram investigados os compostos bioativos presentes na acerola, em especial a vitamina C, considerada uma das maiores fontes naturais encontradas nesta

fruta. A Figura 2.4 apresenta os resultados da análise de vitamina C para a polpa pura e os pós obtidos através da secagem em leito de espuma, evidenciando a influência dos diferentes agentes espumantes e temperaturas (60 °C e 70 °C) utilizadas na secagem. A Figura 2.4a permite observar a composição de vitamina C para cada tratamento, enquanto a Figura 2.4b demonstra a retenção deste importante nutriente.

Figura 2.5 – Conteúdo de vitamina C da polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura, em base seca (a) e retenção de vitamina C durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C)



Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa pura de acordo com o teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

O teor de vitamina C nas amostras de polpa da fruta pura variou de 19468,76 a 16596,30 mg vit. C/100g amostra (bs), pois os ensaios foram realizados com dois lotes

diferentes de matéria prima. A Figura 2.5a apresenta uma comparação mais geral dos teores encontrados nas espumas em relação ao conteúdo médio de vitamina C dos dois lotes de matéria prima, o que permite avaliar a quantidade de vitamina C que os pós apresentam, ao final da secagem, em valores absolutos. Assim, apesar de todos os tratamentos do pó de acerola, quando comparados à polpa, apresentarem valores de vitamina C significativamente menores, todos eles contêm mais do que 10 g de vitamina C por 100 g de sólidos, o que representa um elevado teor de vitamina, se considerarmos que os pós, após a secagem, contêm teores de em torno de 3% de água.

A Figura 2.5b apresenta a retenção da vitamina C durante todo o processamento, que considera as etapas a partir da polpa, isto é, vai desde a preparação da espuma até a finalização da secagem. Para isso, os sólidos totais contidos em todos os ingredientes utilizados na formação das espumas foram computados, de forma que não interferissem no cálculo da retenção da vitamina. Além disso, para medir a retenção da vitamina durante o processo, foi considerado o conteúdo de vitamina C determinado na polpa do lote utilizado em cada ensaio experimental. Com isso, foi possível avaliar as perdas que ocorreram durante todo o processamento, até a finalização da secagem.

Constataram-se perdas de vitamina C em todos os tratamentos, o que está relacionado à sensibilidade dessa vitamina à secagem com ar aquecido, que é facilmente degradada pela exposição a altas temperaturas, ao oxigênio, à luz, e ainda é afetada pelo conteúdo de água (SANTOS; SILVA, 2008).

A temperatura aplicada na secagem influenciou a retenção final de vitamina C em todos os tratamentos, sendo que à temperatura de 70 °C houve maior conservação deste composto. Atribuiu-se esse resultado às maiores taxas de secagem da espuma à temperatura de 70 °C, que causaram redução mais rápida do conteúdo de água, expondo a espuma a um tempo menor de secagem que à 60 °C. Além da redução do tempo de secagem, constatou-se que a taxa de redução do conteúdo de água também pode ter causado efeito sobre a retenção. Apesar da temperatura ser um fator reconhecidamente acelerador da taxa de degradação, o conteúdo de água afeta a taxa de maneira variada, acelerando em determinadas faixas de umidade, mas desacelerando em faixas menores devido ao aumento da viscosidade (SANTOS; SILVA, 2008). Concluiu-se, portanto, que a retenção da vitamina, durante a secagem, foi mais influenciada pela taxa de secagem do que pelo efeito de degradação da temperatura. Outros estudos relataram diminuição na retenção de vitamina C após o tratamento térmico em secagem em leite de espuma, como polpa de tomate (HOSSAIN et al., 2021) e polpa de cumbeba (DIÓGENES et al., 2022).

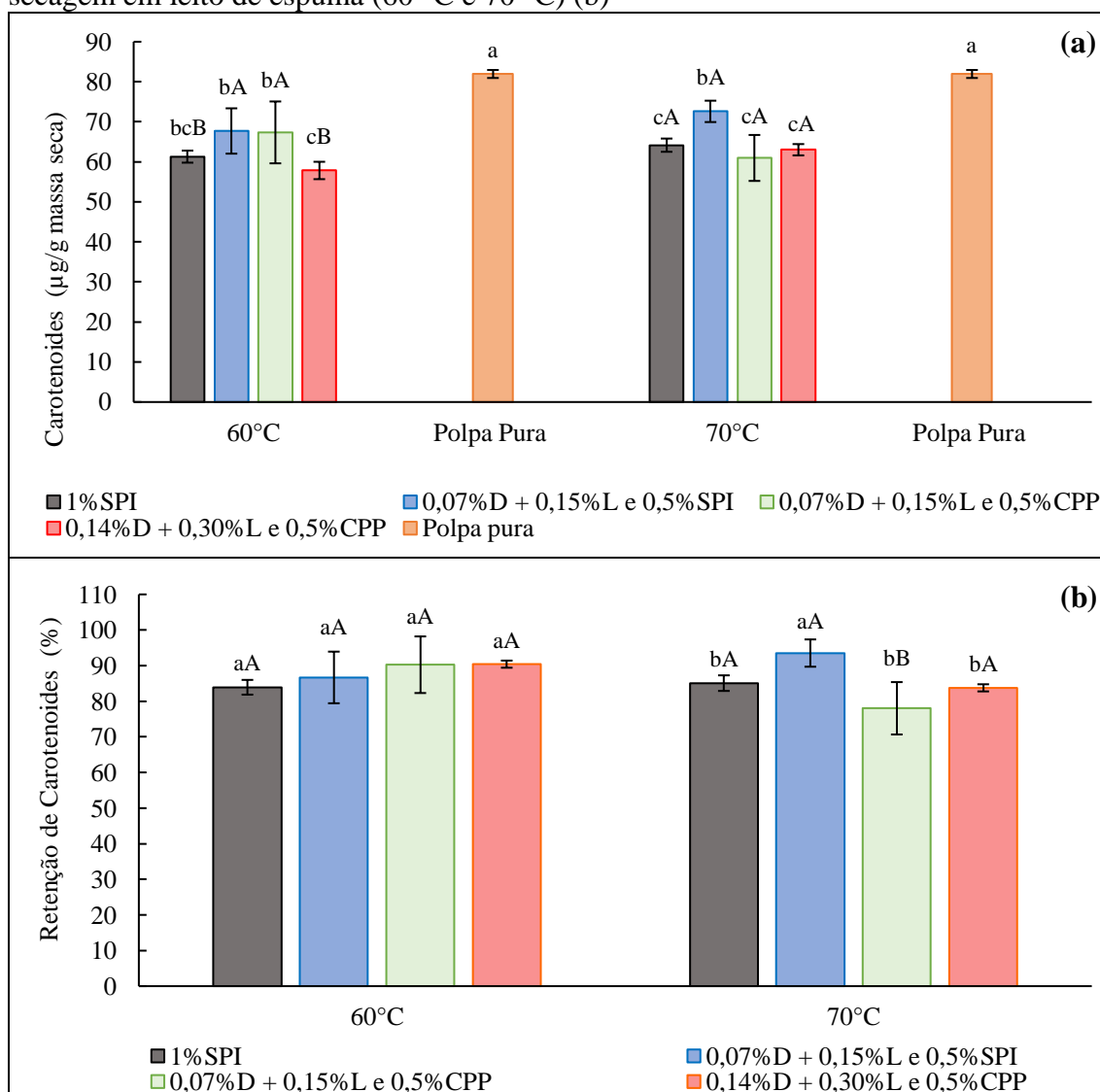
É válido ressaltar que a retenção de vitamina C também foi influenciada pelos aditivos, quando se compara um mesmo tratamento entre as diferentes temperaturas. Na Figura 2.5b, comparando-se todos os tratamentos na temperatura de 60 °C, o tratamento com SPI e aditivos L e D apresentou maior retenção de vitamina C que os demais tratamentos, que se equiparam entre si. Para a temperatura de 70 °C, observa-se que a retenção também foi superior para SPI com mistura de L e D, seguido pela formulação com apenas SPI. O tratamento com CPP que continha maior concentração de L e D, a 70 °C, apresentou retenção significativamente inferior às demais formulações, nessa temperatura, podendo ser justificado devido a esta formulação conter maiores quantidades de agentes espumantes e produzir uma espuma com menores densidades e maior *overrun* dados apresentados na Tabela 2.4, logo apresentando uma espuma com maior área de superfície de contato do material com o ar. Sob o ponto de vista de Fernandes et al. (2014), o aumento da superfície de contato entre a espuma e o ar expõe mais o vitamina C aos efeitos oxidativos da luz e do oxigênio, o que leva à redução de sua retenção.

Uma vez que a vitamina C é altamente instável, sua perda durante o processamento considerada é esperada, mas visto que ao final do processamento de secagem em leito de espuma da polpa de acerola, obtiveram-se retenções acima de 69%, e pós de acerola apresentaram conteúdo superior a 10 g de vitamina C/100 g de sólidos, conclui-se que o produto obtido por esta técnica pode ser considerado um preparado rico em vitamina C.

2.3.6 Teor total de carotenoides

Os carotenoides são uma importante classe de compostos bioativos presentes em frutas e vegetais, responsáveis por exibirem uma ampla gama de cores, como amarelo, laranja, vermelho e roxo (ABD EL-SALAM et al., 2020). A Figura 2.6 apresenta os resultados da análise dos teores de carotenoides totais (expressos em β -caroteno) para a polpa pura de acerola e para os pós obtidos por meio da secagem em leito de espuma a 60 e 70 °C, utilizando diferentes agentes espumantes. Os resultados permitem a observação do efeito da temperatura sobre a retenção de carotenoides, bem como da influência dos diferentes agentes espumantes nos teores de carotenoides totais. A Figura 2.6a permite observar a composição de carotenoides para cada tratamento, enquanto a Figura 2.6b demonstra a retenção deste importante nutriente.

Figura 2.6 – Conteúdo de carotenoides da polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura, em base seca (a) e retenção de carotenoides durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C) (b)



Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha.

Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa pura de acordo com o teste de Tukey. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

O teor de carotenoides na polpa pura diminuiu significativamente para todos os tratamentos na obtenção do pó de acerola. Segundo Ayetigbo et al. (2019), tal perda pode ser atribuída ao efeito da degradação térmica durante a secagem, mas também da agitação para formação das espumas, que proporciona um aumento da exposição dos carotenoides aos radicais de oxigênio que atacam suas ligações conjugadas e provavelmente formam compostos secundários.

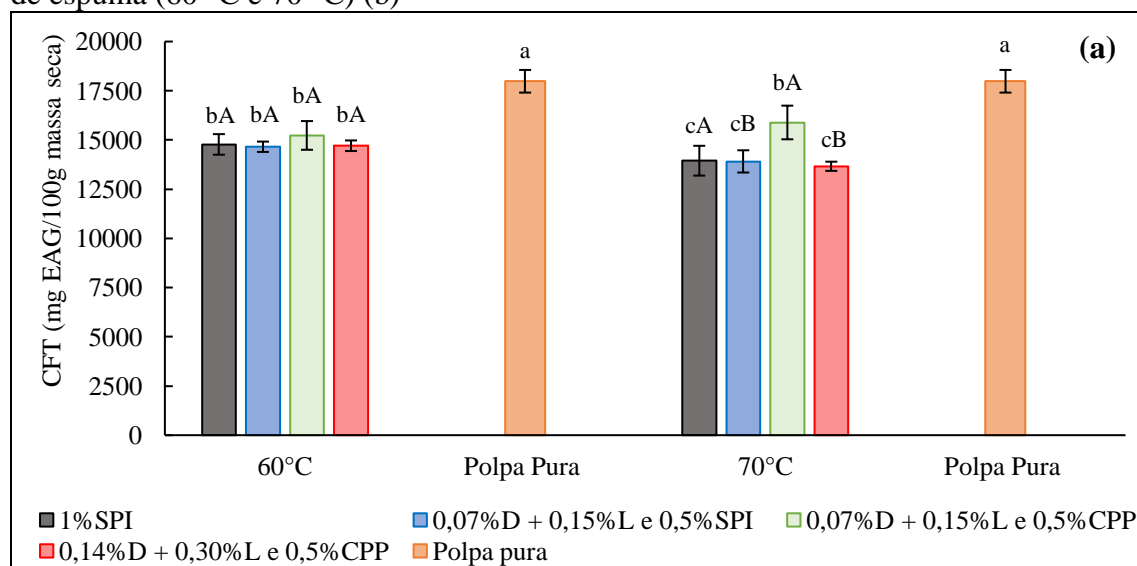
A retenção de carotenoides foi pouco influenciada pela temperatura, com exceção do tratamento com CPP e mistura de L e D na menor concentração, cuja retenção a 60°C foi significativamente maior que a 70 °C. Na maior temperatura, a composição também influenciou a retenção, que foi maior para a formulação com SPI e mistura de L e D em comparação com as demais formulações. Kumar et al. (2022) chama a atenção para a vulnerabilidade à oxidação e degradação térmica deste composto devido à estrutura química insaturada.

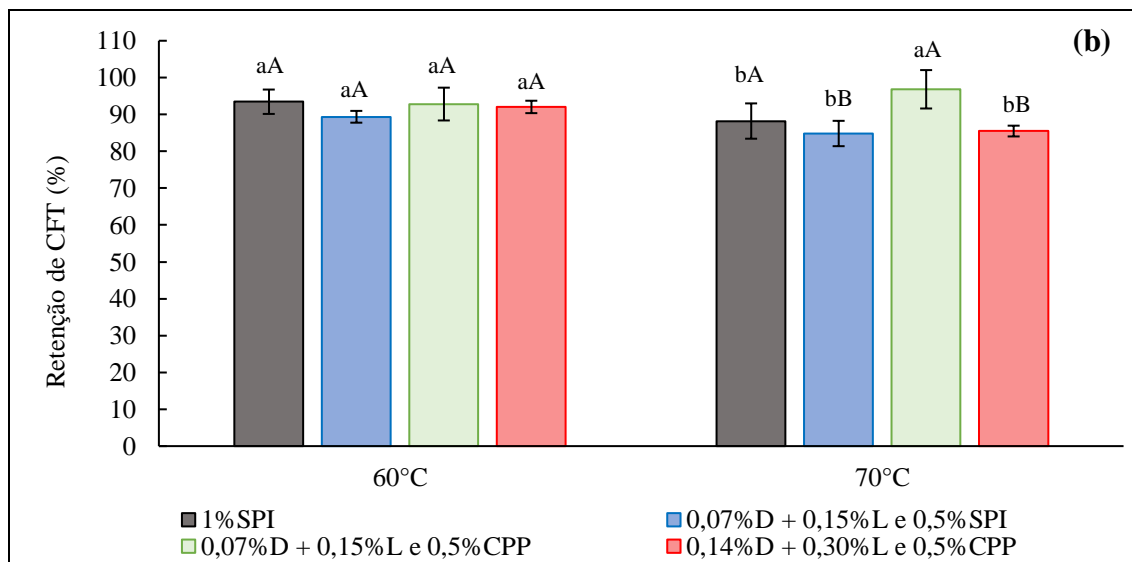
De maneira geral, todos os valores de retenção foram altos, acima de 78%, indicando que a técnica de secagem utilizada preservou bem os carotenoides.

2.3.7 Compostos Fenólicos Totais (CFT)

A Figura 2.7 apresenta o efeito dos aditivos e da temperatura de secagem sobre o conteúdo de CFT (mg EAG/100g sólidos secos) da polpa de acerola desidratada e da polpa de acerola fresca (Figura 2.7a) e a retenção dos CFT durante a secagem em leito de espuma (Figura 2.7b).

Figura 2.7– Conteúdo de CFT de polpa de acerola desidratada com diferentes agentes espumantes e polpa pura em base seca (a) e retenção de CFT durante a secagem em leito de espuma (60 °C e 70 °C) (b)





Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha.

Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa pura de acordo com o teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação à composição dos CFT apresentados na Figura 2.6^a, é possível perceber seu conteúdo original (polpa pura) sofreu efeito da temperatura e dos aditivos aplicados. Tavares et al. (2019) reportam que os compostos fenólicos podem sofrer degradação térmica, oxidativa, modificações químicas ou, ainda, ligar-se a outros componentes (como proteínas e peptídeos) em temperaturas de secagem mais altas, resultando em uma diminuição no teor de fenólicos totais.

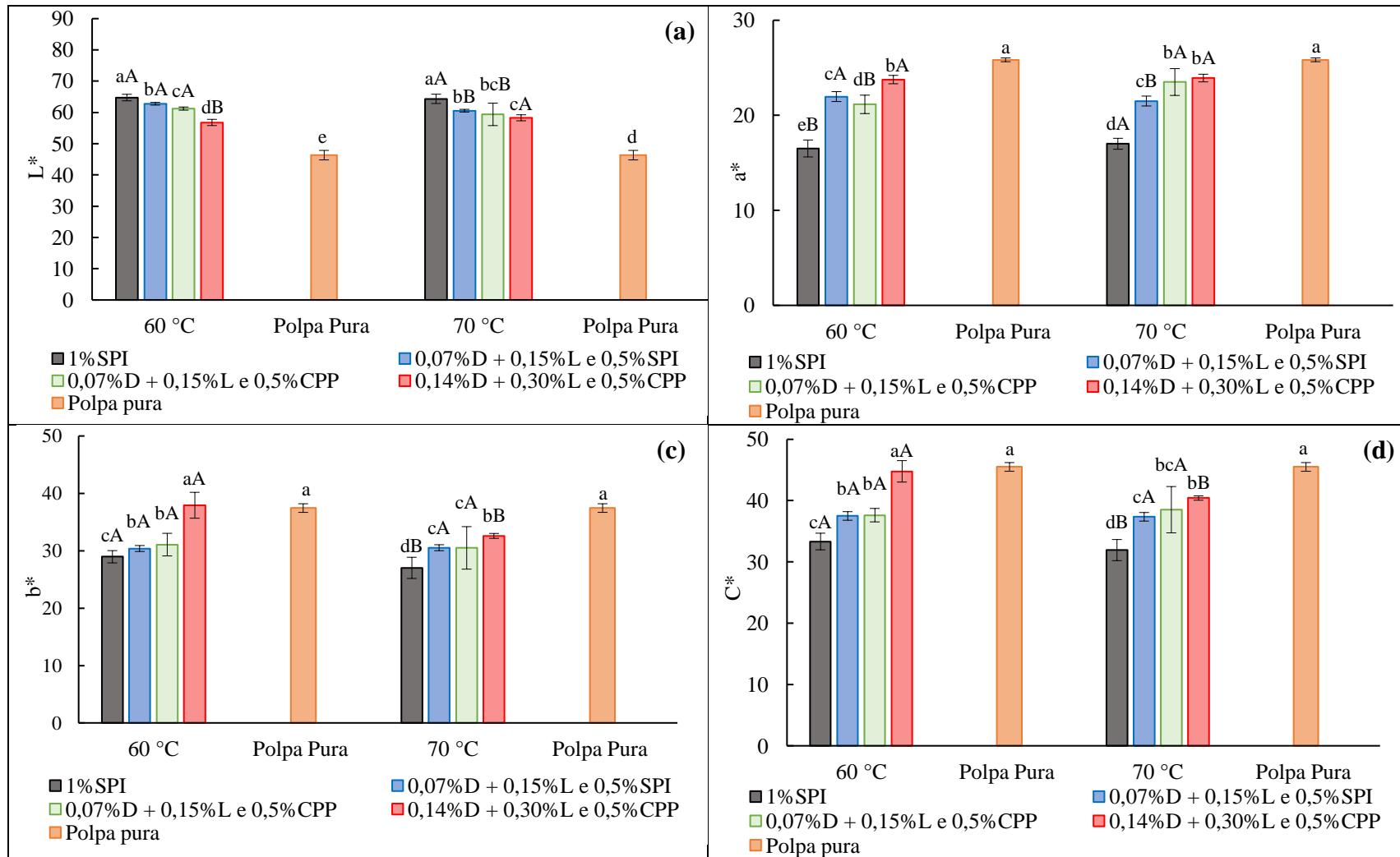
Como evidenciado na Figura 2.7b, não foi observada diferença significativa na retenção de CFT entre os tratamentos com diferentes agentes espumantes, quando a temperatura de secagem foi 60 °C. Adicionalmente, foi constatado que a formulação apenas com SPI e a com CPP e mistura de L e D na menor concentração proporcionaram uma maior retenção de compostos à temperatura de 60 °C em comparação com a secagem à 70 °C. Esses resultados são consistentes com observações pesquisa sobre feijão-arroz (*Vigna umbellata*) desidratado em leito de espuma, na qual os autores constataram que o aumento da temperatura de secagem de 60 °C para 70 °C elevou a degradação dos CFT, o que foi atribuído ao efeito deletério do calor (SRITONGTAE; MORGAN; DUANGMAL, 2017).

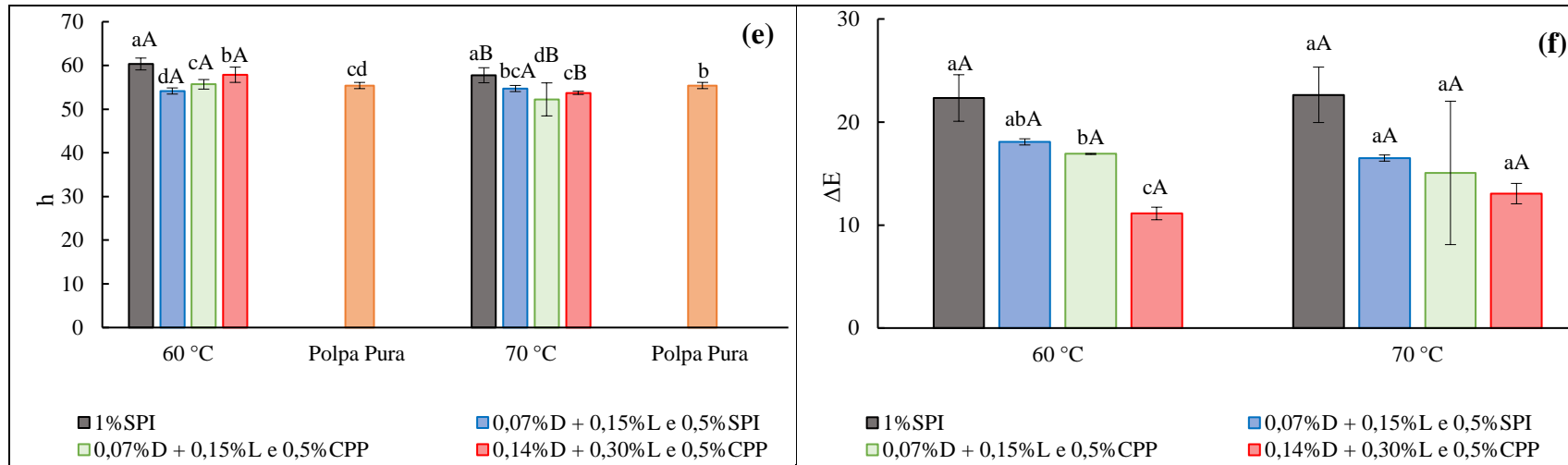
Na temperatura mais alta, a formulação com CPP e mistura de L e D na menor concentração foi a que mais conservou os CFT.

2.3.8 Cor

A cor é uma das características mais importantes entre as propriedades de qualidade de alimentos, pois é um dos primeiros atributos avaliados pelo consumidor e influencia fortemente a aceitabilidade do produto. Na Figura 2.8, pode-se observar o comportamento dos parâmetros de cor da polpa e dos pós de acerola obtidos através da secagem em leito de espuma utilizando diferentes tipos de agentes espumantes de origem vegetal e aplicação de temperaturas de 60 °C e 70 °C.

Figura 2.8 – Comparação de parâmetros de cor entre a polpa de acerola pura e os pós obtidos por secagem em leite de espuma a 60 °C e 70 °C





Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha.

Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa pura de acordo com o teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao parâmetro L^* , observa-se que a polpa pura é mais escura que todos os tratamentos, o que se atribui à ausência de agentes espumantes misturados a ela. Brar et al. (2019) observaram resultados semelhantes de clareamento de cor com a adição de agentes espumantes, quando comparados com a polpa pura. Além disso, os pós com CPP e mistura de L e D nas maiores concentrações apresentam valores mais baixos quando comparados com os demais tratamentos. A concentração e o tipo de pigmentos presentes influenciam este parâmetro, como apontam Viuda-Martos et al. (2012).

Entre as características de cor da acerola, o parâmetro a^* é um dos mais relevantes, pois reflete a intensidade da cor vermelha. Observou-se que a polpa pura foi consideravelmente influenciada pelos agentes espumantes utilizados, sendo que a formulação que continha apenas SPI apresentou valores de a^* e b^* menores do que os outros pós.

Segundo Chaux-Gutiérrez et al. (2017), o croma e o ângulo hue são de grande importância na caracterização da cor dos alimentos, por representar tanto sua tonalidade quanto a intensidade (ou nível de saturação) da tonalidade. O ângulo hue (h) indica a tonalidade da cor, sendo que ângulo 0° representa vermelho, 90° amarelo, 180° verde e 270° azul (LI et al., 2021). Os pós apresentaram pequenas variações no ângulo hue, em uma faixa que foi de 52 a 60, sendo que a polpa de acerola pura tinha um ângulo hue com valor médio de 55,4 que caracteriza uma tonalidade alaranjada.

A partir do valor da diferença total de cor (ΔE), é possível avaliar a magnitude da diferença de cor entre a polpa de acerola fresca e os pós com diferentes agentes espumantes. De acordo com Castellar, Obón e Fernández-López (2006), quando ΔE ultrapassa o valor de 5, o olho humano consegue distinguir a diferença entre as cores. Dessa forma, pode-se concluir que a utilização de diferentes agentes espumantes ocasionou uma diferença perceptível em comparação à polpa pura, evidenciando que a formulação contendo SPI em sua composição apresentou uma maior discrepância dos parâmetros de cor em relação à polpa pura, enquanto a formulação contendo CPP e L e D nas maiores quantidades foi a que menos causou diferenças em relação à polpa. As temperaturas não causaram diferença significativa em nenhum dos tratamentos, indicando que as diferenças ΔE foram pequenas e, possivelmente, imperceptíveis a olho nu.

2.4 CONCLUSÕES

Este estudo mostrou que a cinética de secagem em leito de espuma da polpa de acerola utilizando diferentes agentes espumantes de origem vegetal foi bem descrita pelo modelo de

Page. O modelo de difusão apresentou ajustes regulares aos dados experimentais, possivelmente por apresentar período de taxa constante de secagem e ter difusividade anômala com comportamento superdifusivo.

A temperatura e os aditivos influenciaram a retenção de vitamina C, carotenoides e CFT durante o processo de secagem. Para uma mesma formulação, a temperatura de 70 °C proporcionou retenções superiores de vitamina C em relação à temperatura de 60 °C, o que pode ser atribuído ao menor tempo de exposição da vitamina ao oxigênio, ao calor e a altos níveis de umidade, proporcionando maior preservação deste composto. Por outro lado, os CFT e os carotenoides, para algumas formulações específicas, foram preservados de forma mais eficiente na temperatura de 60 °C.

Os teores de vitamina C nos pós desidratados foram altos, superiores a 10 g de vitamina por 100 g de sólidos secos. Quanto à influência dos aditivos aplicados sobre a retenção de vitamina C, constata-se que para uma mesma temperatura de secagem, a formulação com SPI e mistura de L e D foi a que demonstrou melhor eficácia na retenção desses bioativos. A retenção de carotenoides, em todos os tratamentos, foi superior a 78%. CFT não apresentou diferença significativa na retenção entre as diferentes formulações secadas à temperatura de 60 °C, porém, a 70 °C, ela foi significativamente maior para a formulação com CPP com a mistura de L e D na menor concentração. A retenção de CFT foi superior a 84% em todos os tratamentos.

A utilização de diferentes agentes espumantes resultou em variações perceptíveis da cor em comparação com a polpa pura. A formulação com SPI mostrou as maiores discrepâncias nos parâmetros de cor, enquanto a fórmula com maiores quantidades de CPP, L e D causou menos diferenças em relação à polpa. As temperaturas não tiveram um impacto significativo, sugerindo que as diferenças ΔE foram mínimas e talvez imperceptíveis a olho nu.

Em geral a secagem em leito de espuma de polpa de acerola demonstrou ser um processo simples e de fácil aplicação, que pode proporcionar produtos com elevado conteúdo nutricional.

2.5 REFERÊNCIAS

ABD EL-SALAM, E. A. E. S.; ALI, A. M.; HAMMAD, K. S. Foaming process optimization, drying kinetics and quality of foam mat dried papaya pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, p. 1449-1461, 2021.

ABD KARIM, A.; WAI, C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64, n. 3, p. 337-343, 1999.

AFIFAH, N.; SARIFUDIN, A.; KUMALASARI, R.; INDRIANTI, N.; RATNAWATI, L.; KARIM, M. A.; HANIFAH, U.; HARYANTO, A.; SIREGAR, Y.H.; TAUFAN, A. Foaming properties, microstructure, and mathematical model of foam mat drying of pasta sauce based on tomato. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 40, n. 2, p. 130-137, 2022.

AMADO, L. R.; SILVA, K. D. S.; MAURO, M. A. Drying of mangoes (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) at changeable temperature conditions—Effects on energy consumption and quality of the dehydrated fruit. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 2, p. e13615, 2021.

ARAÚJO, C. D. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. D. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. Cinética de secagem de acerola em leite de espuma e ajuste de modelos matemáticos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, 2017.

ASAMI, D. K.; HONG, Y. J.; BARRETT, D. M.; MITCHELL, A. E. Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 5, p. 1237-1241, 2003.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 16th ed., Washington, DC.: Chemists, 1995.

AYETIGBO, O.; LATIF, S.; ABASS, A.; MÜLLER, J. Preparation, optimization and characterization of foam from white-flesh and yellow-flesh cassava (*Manihot esculenta*) for powder production. **Food Hydrocolloids**, v. 97, p. 105205, 2019.

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; HOSSEIN, H.K.M.; VARIDI, M. Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). **Drying Technology** 32, no. 4 (2014): 374-384.

BEGUM, A.; KALITA, D.; BHATTACHARYA, S.; SRIVASTAVA, B. Time-dependent rheological behavior of pineapple pulp foam and its relationship with foaming properties and quality attributes of dried powder. **Journal of Food Engineering**, v. 336, p. 111208, 2023.

BENASSI, M. D. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of metaphosphoric and oxalic acids as extractants solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables, **Arquivos de Biologia e Tecnologia** v. 31, n. 4, p. 507-513, 1988.

BRAR, A. S.; KAUR, P.; KAUR, G.; SUBRAMANIAN, J.; KUMAR, D.; SINGH, A. Optimization of process parameters for foam-mat drying of peaches. **International Journal of Fruit Science**, v. 20, n. sup3, p. S1495-S1518, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa N° 37 de 01 de outubro de 2018. **Estabelece em todo o território nacional a complementação dos Padrões de Identidade e Qualidade de Suco e Polpa de Fruta**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/76oder76at/produtos-vegetal/76oder76ate76-1/bebidas>> Acesso em 25/12/2022.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC n°726, de 1° de julho de 2022, **dispõe sobre os requisitos sanitários dos**

cogumelos comestíveis, dos produtos de frutas e dos produtos de vegetais. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 2022.

CARDOSO, C. E. D. F.; LOBO, F. A. T. F.; TEODORO, A. J Influence of foam mat drying on the nutritional and technological potential of fruits—a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 1-15, 2022.

CASTELLAR, M. R.; OBÓN, J. M.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A. The isolation and properties of a concentrated red-purple betacyanin food colourant from *Opuntia stricta* fruits. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 1, p. 122-128, 2006.

CANIZARES, D.; MAURO, M. A. Enhancement of quality and stability of dried papaya by pectin-based coatings as air-drying pretreatment. **Food and Bioprocess Technology**, v. 8, p. 1187-1197, 2015.

CELIA, J. A.; RESENDE, O.; CAROCHO, M.; FINIMUNDY, T.; DE OLIVEIRA, K. B., GOMES, F. P.; QUEQUETO, L.B.; JUNIOR, W. N. F. Drying kinetics of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum* J. Presl) leaves: effects on individual volatile compounds and external color. **Journal of Essential Oil Research**, p. 1-11, 2023.

CHAUX-GUTIÉRREZ, A. M.; SANTOS, A. B.; GRANDA-RESTREPO, D. M.; MAURO, M. A. Foam mat drying of mango: Effect of processing parameters on the drying kinetic and product quality. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 631-641, 2017.

COELHO, B. E. S.; TORRES, G.; 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. 7685, 2019.

CÓL, C. D.; TISCHER, B.; FLÔRES, S. H.; RECH, R. Foam-mat drying of bacaba (*Oenocarpus bacaba*): Process characterization, physicochemical and antioxidant activity. **Food and Bioprocess Technology**, v. 126, p. 23-31, 2021.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L. **Química de alimentos de Fennema**. Artmed editora, 2018.

DIÓGENES, A. D. M. G.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. D. M.; FERREIRA, J. P. D. L.; SILVA, W. P. D., GOMES, J. P.; SANTOS, F.S.; CASTRO, D.S.; OLIVEIRA, M.N.; SANTOS, D.C.; ANDRADE, R.O.; LIMA, A. R. C. D. Mathematical models to describe the foam mat drying process of cumbeba pulp (*Tacinga inamoena*) and product quality. **Foods**, v. 11, n. 12, p. 1751, 2022.

FEMENIA, A.; SERRANO, G.S.; SIMAL, S.; GARAU, M.C.; EIM, V.S.; ROSSELLÓ, C. Effects of air-drying temperature on the cell walls of kiwifruit processed at different stages of ripening. **Food Science and Technology**. V. 42, n. 1, p. 106-112, 2009.

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

FILIPPIN, A. P.; MOLINA FILHO, L.; FADEL, V.; MAURO, M. A. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption. **Drying technology**, v. 36, n. 14, p. 1662-1677, 2018.

GLUSAC, J.; DAVIDESKO-VARDI, I.; ISASCHAR-OVDAT, S.; KUKAVICA, B.; FISHMAN, A. Gel-like emulsions stabilized by tyrosinase-crosslinked potato and zein proteins. **Food Hydrocolloids**, v. 82, p. 53-63, 2018.

HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: A review. **Critical reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 12, p. 2560-2572, 2017.

HOSSAIN, M.A.; MITRA, S.; BELAL, M.; ZZAMAN, W. Effect of foaming agent concentration and drying temperature on biochemical properties of foam mat dried tomato powder. **Food Research**, 5(1), pp.291-297.2021

IZADI, Z.; MOHEBBI, M.; SHAHIDI, F.; VARIDI, M.; SALAHI, M. R. Cheese powder production and characterization: A foam-mat drying approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 123, p. 225-237, 2020.

KIM, S. H.; TANAKA, F.; TANAKA, F. Drying kinetics and determination of effective moisture diffusivity and activation energy in cucumber pericarp tissues using thin-layer drying models. **Food Science and Technology Research**, v. 27, n. 2, p. 181-192, 2021.

KUMAR, A.; KANDASAMY, P.; CHAKRABORTY, I.; HANGSHING, L. Analysis of energy consumption, heat and mass transfer, drying kinetics and effective moisture diffusivity during foam-mat drying of mango in a convective hot-air dryer. **Biosystems Engineering**, v. 219, p. 85-102, 2022.

LEWICKI, P. P. Design of hot air drying for better foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, n. 4, p. 153-163, 2006.

LI, T. S.; SULAIMAN, R.; RUKAYADI, Y.; RAMLI, S. Effect of gum Arabic concentrations on foam properties, drying kinetics and physicochemical properties of foam mat drying of cantaloupe. **Food Hydrocolloids**, v. 116, p. 106492, 2021.

MARIANO-NASSER, F. D. C.; NASSER, M. D.; FURLANETO, K. A.; RAMOS, J. A.; VIEITES, R. L.; PAGLIARINI, M. K. Bioactive compounds in different acerola fruit cultivares. **Semina: Ciências Agrárias (Londrina)**, v. 38, n. 4 Suppl. 1, p. 2505-2514, 2017.

MARQUART, D. W. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n.2, p431-41, 1963.

MISKINIS, R. D. A. S.; DO NASCIMENTO, L. Á.; COLUSSI, R. Bioactive Compounds from Acerola Pomace: A review. **Food Chemistry**, p. 134613, 2022.

MOLINA FILHO, L.; FRASCARELI, E. C.; MAURO, M. A. Effect of an edible pectin coating and blanching pretreatments on the air-drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 9, n. 5, p. 859-871, 2016.

NASCIMENTO FILHO, E.; SILVA, N. N. B.; CONVERTI, A.; GROSSO, C. R. F.; SANTOS, A. M. P.; RIBEIRO, D. S.; MACIEL, M. I. S. Microencapsulation of acerola (*Malpighia Emarginata* DC) and ciriguela (*Spondias Purpurea* L) mixed juice with different wall materials. **Food Chemistry Advances**, p. 100046, 2022.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36-60, 2013.

PRAKASH, A.; BASKARAN, R. Acerola, an untapped functional superfruit: a review on latest frontiers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 9, p. 3373-3384, 2018.

REIS, F. R.; DE MORAES, A. C. S.; MASSON, M. L. Impact of foam-mat drying on plant-based foods bioactive compounds: A review. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 76, n. 2, p. 153-160, 2021.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; KIMURA, M. **HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis**. Washington: International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2004.

SANTOS, P. H. S.; SILVA, M. A. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables—A review. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1421-1437, 2008.

SIMPSON, R.; RAMÍREZ, C.; NUÑEZ, H.; JAQUES, A.; ALMONACID, S. Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. **Trends in Food Science & Technology**, v. 62, p. 194-201, 2017.

SRITONGTAE, B.; MORGAN, M. R.; DUANGMAL, K. Drying kinetics, physico-chemical properties, antioxidant activity and phenolic composition of foam-mat dried germinated rice bean (*Vigna umbellata*) hydrolysate. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 52, n. 7, p. 1710-1721, 2017.

TAVARES, I. M.C.; DE CASTILHOS, M. B. M.; MAURO, M. A.; RAMOS, A. M.; DE SOUZA, R. T.; GÓMEZ-ALONSO, S.; GOMES, E.; DA-SILVA, R.; HERMOSÍN-GUTIÉRREZ, I.; LAGO-VANZELA, E. BRS Violeta (BRS Rúbea× IAC 1398-21) grape juice powder produced by foam mat drying. Part I: Effect of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity. **Food Chemistry**, v. 298, p. 124971, 2019.

TEKGÜL, Y. Optimization of foaming process: drying behaviour, physicochemical, and powder properties of hot air-assisted foam-mat dried nectarine. **International Journal of Food Engineering**, v. 17, n. 10, p. 815-826, 2021.

VIUDA-MARTOS, M.; RUIZ-NAVAJAS, Y.; MARTIN-SÁNCHEZ, A.; SÁNCHEZ-ZAPATA, E.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.; SENDRA, E.; SAYAS-BARBERÁ, E.; NAVARRO, C.; PÉREZ-ÁLVAREZ, J. A. Chemical, physico-chemical and functional properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses powder co-product. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 220-224, 2012.

ZHANG, M.; CHEN, H.; MUJUMDAR, A. S.; TANG, J.; MIAO, S.; WANG, Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1239-1255, 2017.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.

Capítulo 3

*CARACTERIZAÇÃO DE PÓS DE POLPA
DE ACEROLA PRODUZIDOS POR
SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA COM
AGENTES ESPUMANTES VEGETAIS:
ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS E
MORFOLÓGICAS*

3- CARACTERIZAÇÃO DE PÓS DE POLPA DE ACEROLA PRODUZIDOS POR SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA COM AGENTES ESPUMANTES VEGETAIS: ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MORFOLÓGICAS

RESUMO

Acerola é uma fruta rica em compostos bioativos, mas sua vida útil é curta. A secagem em leito de espuma surge como uma alternativa econômica para prolongar sua vida útil e desenvolver produtos inovadores, sendo uma técnica simples e de menor custo operacional que liofilização ou secagem por atomização. Os pós de acerola têm ganhado popularidade como substitutos naturais de suplementos sintéticos, além de serem utilizados em uma variedade de produtos alimentícios, buscando melhorar o sabor, a qualidade e o teor de nutrientes. A substituição de proteínas animais por vegetais tem se mostrado promissora frente ao aumento da demanda por produtos de origem vegetal. Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar propriedades físicas, morfológicas e de cor de pós de polpa de acerola obtidos por liofilização e secagem em leito de espuma às temperaturas de 60 e 70 °C, aplicando diferentes agentes espumantes de origem vegetal, a saber: isolado proteico de soja (SPI), concentrado proteico de ervilha (CPP), ésteres de mono e diglicerídeos com ácido láctico (L) e monoglicerídeos destilados (D). A presença dos agentes espumantes afetou significativamente a solubilidade e a molhabilidade dos pós, dependendo da composição e temperatura. Os padrões de difração de raios-X dos pós de acerola apresentaram padrões de materiais amorfos. A morfologia dos pós liofilizados demonstrou alta higroscopicidade das partículas, com visível agregação e aspecto de dissolução parcial, o que foi atribuído ao teor elevado de açúcar. A adição de agentes espumantes alterou a morfologia das partículas, que se mostraram mais dispersa, mas ainda se observou formação de agregados, com uma leve redução de tamanho nos pós secados a 70 °C. As isotermas de adsorção de água ficaram entre o tipo II e o tipo III, típicas de alimentos com presença de polímeros e com alto teor de açúcar. Os pós reconstituídos em água mostraram pequenas diferenças de cor em função das formulações e temperaturas de secagem, sendo que o pó liofilizado apresentou tonalidade mais preservada, um pouco mais avermelhada que a grande maioria das formulações. Conclui-se que todos os agentes espumantes apresentados neste estudo são viáveis para elaborar pós com características desejáveis, destacando-se os pós obtidos com SPI, sem e com L e D, e secados à temperatura de 70 °C.

Palavras-chave: Isotermas de sorção; MEV; solubilidade

3.1 INTRODUÇÃO

A acerola se destaca pela sua riqueza em compostos bioativos, como ácido ascórbico, compostos fenólicos (incluindo antocianinas e flavonoides) e carotenoides, que oferecem diversos benefícios à saúde (BELWAL et al., 2018). No entanto, devido a sua vida útil ser curta, é necessário empreender esforços para sua extensão, através do aprimoramento de processos de aproveitamento já existentes ou do desenvolvimento de novos processos.

Esses desafios podem ser superados por meio de tecnologias de processamento adequadas e estratégias de conservação que permitem a manutenção das propriedades nutricionais e sensoriais da acerola em produtos inovadores e saudáveis para o consumo humano. Dentre as diversas técnicas de conservação de alimentos, a secagem se destaca como um dos métodos mais antigos de preservação. Existe uma vasta gama de tecnologias industriais para desidratar os alimentos, sendo a liofilização frequentemente considerada como o método padrão ou de referência em muitos estudos de pesquisa, uma vez que proporciona produtos de alta qualidade. No entanto, é importante ressaltar que os custos operacionais e de capital associados à liofilização são significativamente elevados, o que restringe sua aplicação a produtos de alto valor agregado (BHATTA; JANEZIC; RATTI, 2020).

A secagem em leito de espuma pode ser uma técnica alternativa para auxiliar a superar esses desafios, por ser simples e econômica, apresentando vantagens significativas em relação custos de capital e operacionais. Esse método consiste em transformar alimentos líquidos ou semilíquidos em pó, através da formação de espumas estáveis pelo batimento do alimento com agentes espumantes e estabilizadores, seguida pela desidratação das espumas com ar aquecido que, posteriormente são moídas, resultando no produto acabado em forma de pó (AYETIGBO et al., 2023; ABD EL-SALAM et al., 2021; DEHGHANNYA et al., 2018).

Produtos de acerola têm se tornado cada vez mais populares na indústria de alimentos e bebidas como uma alternativa natural aos suplementos de vitamina C sintéticos e outros antioxidantes artificiais (BELWAK et al., 2018; MATUDA et al., 2001). Concentrados de acerola vêm sendo utilizados em uma ampla variedade de produtos industriais, como bebidas, sobremesas, alimentos infantis, suplementos alimentares, conservantes de carne, produtos de panificação e confeitaria, com o objetivo de melhorar o sabor, qualidade dos produtos bem como aumentar o teor de nutrientes e antioxidantes (BELWAL et al., 2018; MARTÍNEZ-ZAMORA et al., 2021).

A demanda por produtos de origem vegetal tem crescido de forma significativa nos últimos anos, impulsionada pela preocupação dos consumidores em adotar dietas mais

sustentáveis e saudáveis, como, por exemplo, dietas flexitarianas, vegetarianas e veganas. Diante disso, a indústria de alimentos tem se empenhado em desenvolver uma ampla variedade de produtos alimentícios de origem vegetal para atender a essa demanda crescente (ONWEZEN et al., 2021).

Entre as diversas opções de ingredientes para atender essa necessidade de produtos, destaca-se a substituição de proteínas animais por proteínas vegetais como uma alternativa vantajosa. Essa substituição não apenas permite que os consumidores mantenham uma ingestão constante de calorias e proteínas, mas também contribui para limitar os impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde (BAZOCHE et al., 2023). Além disso, é importante ressaltar que as proteínas vegetais têm a capacidade de formar espuma, o que desempenha um papel significativo na textura de muitos alimentos processados (MA et al., 2022).

No entanto, é crucial compreender como os pós obtidos a partir de agentes espumantes vegetais se comportam em diferentes condições de processamento e armazenamento, a fim de garantir que esses produtos sejam seguros, nutritivos e agradáveis ao paladar (AYETIGBO et al., 2023). Neste contexto, o objetivo da pesquisa consistiu em caracterizar os pós quanto a suas propriedades de sorção de água, solubilidade, molhabilidade, cristalinidade, características morfológicas e cor dos pós reconstituídos, produzidos através da secagem em leito de espuma com agentes espumantes de origem vegetal, sob diferentes condições de secagem, tendo como controle o pó obtido da liofilização da polpa pura da acerola.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Materiais

A polpa de acerola foi adquirida no comércio local de São José do Rio Preto-São Paulo. O isolado de proteína de soja (SPI) com teor de proteína de 91,14% (base seca) foi adquirido da empresa EcilTrading (Empreendimento Comercial e Industrial Ecil Ltda, São Paulo). O concentrado da proteína de ervilha (CPP) com teor de proteína de 80% (base seca) foi gentilmente doado pela empresa Ecil Trading. Os agentes espumantes monoglicerídeos destilados baseados em óleos vegetais (Dimodan[®] DuPont[™]) e ésteres de mono e diglicerídeos de ácidos graxos com ácido láctico, derivados de óleos vegetais naturais (Grinsted[®] Lactem, DuPont[™]) foram gentilmente doados pela DuPont – Danisco Brasil Ltda.

Os reagentes tolueno e os sais (LiCl, CH₃CO₂K, MgCl₂, K₂CO₃, NaBr, NaNO₂, NaCl) para realização das isotermas foram de grau de pureza PA (Synth, Labsynth, Diadema, Brasil).

3.2.2 Preparação das amostras

Para a adição de SPI, inicialmente preparou-se uma solução estoque aquosa com concentração de 10% SPI (m/m), a qual foi aquecida a 70 °C, sob agitação magnética (200 rpm) (C-MAG HS, IKA, Alemanha), por 20 min (KOKOSZKA et al., 2010). Para a formulação do CPP, preparou-se uma solução estoque aquosa com concentração de 10% CPP (m/m), a qual foi aquecida até 80 °C, sob agitação magnética (200 rpm) (IKA) por 10 min.

Os agentes tensoativos foram preparados como soluções estoque aquosas com 7% (m/m) de Dimodan[®](D) e 15% (m/m) de Lactem (L), mediante aquecimento, sob agitação magnética (200 rpm) (IKA), até 80 °C por 10 min. Para formular as espumas, foram adicionadas, às polpas de acerola, as soluções estoques nas quantidades específicas de cada tratamento.

Os tratamentos tiveram as seguintes quantidades dos aditivos, na espuma final: 1%SPI; 0,07%D+0,15%L+0,05%SPI; 0,07%D+0,15%L+0,5%CPP; 0,14% D+0,30%L+0,5%CPP.

As misturas foram agitadas durante 20 min em uma batedeira doméstica (modelo RI 7110, marca Philips Walita, Brasil) para a formação da espuma. A seguir, as espumas foram dispostas em camadas finas de 3 mm sobre bandejas, e secadas a 60 e 70 °C por convecção forçada de ar aquecido em secador de leito fixo equipado com ventilador centrífugo (CV3600, Ibram, São Paulo, SP, Brasil) com um motor 2 CV, uma câmara de secagem com uma área da seção transversal de $9,61 \times 10^{-2} \text{ m}^2$, e a velocidade do ar ajustado por um inversor de frequência (ML-7.0 / 200-240, WEG, Jaguará do Sul, SC, Brasil) conectado ao motor do ventilador, de aproximadamente 1,4 m/s. As camadas foram retiradas das bandejas e as amostras foram trituradas através de um moinho analítico (A11, IKA, Alemanha) por 1 min.

Além disso, foram preparadas amostras controle da polpa de acerola, que foram congeladas em um ultracongelador (UFR30, Liotop, São Carlos-SP, Brasil) e, em seguida, liofilizadas (L101, Liobras, São Carlos-SP, Brasil) a uma pressão de 24 mmHg durante 24 horas. O condensador foi mantido a -51 °C durante todo o processo de liofilização. As amostras foram, então, acondicionadas em embalagens Tradpouch 80MZ Metalizado com zíper (Gualapack Brasil Indústria e Comércio S.A), as quais foram armazenadas em freezer -18 °C para evitar a absorção de umidade, a fim de serem analisadas.

3.2.3 Métodos analíticos

3.2.3.1 Solubilidade

A solubilidade dos pós foi determinada de acordo com Nunes et al. (2022) com algumas modificações. Uma amostra de 1 g de pó foi dispersada em 50 mL de água destilada e misturada com um agitador magnético sem aquecimento (C-MAG HS, IKA, Alemanha), durante 30 min. Posteriormente, a mistura foi centrifugada (Z326K, Hermle, Alemanha) a 3000 rpm por 15 min. Uma alíquota de 5 mL do sobrenadante foi transferida para uma placa de Petri previamente pesada e levada a uma estufa a vácuo a 70 °C (TE-395, Tecnal, Piracicaba, Brasil) até atingir massa constante.

$$\% \text{Solubilidade} = \frac{m_{\text{res}}}{V_{\text{al}}} \cdot \frac{V_i}{m_i} \cdot 100 \quad (3.1)$$

sendo que:

m_{res} = massa seca do resíduo (g);

V_{al} = volume da alíquota (mL);

V_i = volume inicial da solução (mL);

m_i = massa inicial do pó (g).

3.2.3.2 Molhabilidade

O tempo de molhabilidade é definido como o tempo necessário para molhar todas as partículas das amostras de pó (EL-TINAY; ISMAIL, 1985). As amostras de pó (0,5 g) foram colocadas em 50 mL de água destilada a 25 ± 1 °C em um béquer de 100 mL. O cronômetro foi iniciado a partir da adição das amostras e o tempo necessário para molhar todas as partículas de pó foi registrado.

3.2.3.3 Cristalinidade relativa

Os padrões de difração de raios-X em alto ângulo (WAXS – Wide Angle X-Ray Scattering) das matérias-primas em pó, SPI, CPP, L e D, e dos pós de acerola nas diferentes formulações foram determinados em um difractômetro de bancada (MiniFlex 300, Rigaku, Japão) com radiação de Cu, $L=1,542 \text{ \AA}$ e linha K. Os difratogramas foram determinados entre os ângulos (2θ) de 5° e 50°, a uma velocidade de varredura de 0,02°/min, sendo que as

condições aplicadas foram 50 kV e 30mA. O índice de cristalinidade relativa (ICR) foi quantitativamente estimado pela relação entre a área dos picos e a área total dos difractogramas (HAYAKAWA et al., 1997), em triplicata.

3.2.3.4 Morfologia dos pós secos

Os pós foram inicialmente condicionados a uma umidade relativa (UR) de 11,28% em placas de Petri dispostas em um dessecador com uma solução saturada de cloreto de lítio ao fundo, pelo período de quinze dias, para redução do conteúdo de água. Para a análise, as amostras foram fixadas com fita de carbono em *stubs* de alumínio e em seguida, cobertas por uma fina camada de ouro, sob vácuo, por 3 min. As imagens foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura com feixe duplo que opera com elétrons secundários (SE) (FESEM, Helios NanoLab 600i FIB Workstation, FEI, Hillsboro, Oregon, EUA).

3.2.3.5 Isotermas de sorção

Para a determinação das isotermas de sorção do pó de acerola, foi utilizado o método estático gravimétrico (RIZVI, 1995) na temperatura de 30 °C, que simulam a condição ambiente em diversas umidades relativas, com as quais as amostras são deixadas entrar em equilíbrio. Para isso, foram utilizadas sete soluções aquosas saturadas de sais com umidades relativas conhecidas (Tabela 3.1), as quais foram adicionadas ao fundo de frascos de vidro de aproximadamente 500 mL com tampa hermética. O experimento foi realizado com amostras de aproximadamente 1 g, pesadas em pequenos recipientes plásticos, em triplicata, e dispostas sobre um suporte dentro do frasco de vidro, de modo a acomodá-las acima das soluções salinas.

Tabela 3.1 – Atividade de água de soluções salinas saturadas, a 30 °C

Sal	Fórmula química	Atividade de água
Cloreto de lítio	LiCl	0,113
Acetato de potássio	CH ₃ CO ₂ K	0,216
Cloreto de magnésio	MgCl ₂	0,324
Carbonato de potássio	K ₂ CO ₃	0,432
Brometo de sódio	NaBr	0,560
Nitrito de sódio	NaNO ₂	0,621
Cloreto de sódio	NaCl	0,751

Fonte: Greenspan (1977)

Os frascos foram levados a câmaras de incubação com controle de temperatura (BOD TE-391, Tecnal, Piracicaba, Brasil). Pesagens periódicas foram realizadas em balança analítica com acuracidade de 0,0001g (AUY220, Shimadzu, Kyoto, Japão), até as amostras atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente. A umidade inicial e final foi determinada em estufa a vácuo a 60 °C (TE-395, Tecnal, Piracicaba, Brasil) até atingir massa constante.

Para a descrição matemática das isotermas de sorção, os seguintes modelos foram ajustados aos resultados experimentais:

Modelo de BET

$$X = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (3.2)$$

Modelo de GAB

$$X = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (3.3)$$

Modelo de Oswin

$$X = a \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^b \quad (3.4)$$

em que:

C, K, a, b = constantes;

X = conteúdo de umidade em base seca (kg água/kg matéria seca);

X_m = conteúdo de umidade da monocamada em base seca (kg água/kg matéria seca);

a_w = atividade de água.

3.2.3.6 Análise de cor

Avaliou-se o pó reidratado de acordo com metodologia de Darniadi, Ho e Murray (2017), dissolvendo-se 0,5 g de pó em 50 mL de água destilada, imediatamente antes de analisar

a solução no espectrofotômetro. A cor foi medida em quatro posições, nos ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°, utilizando um espectrofotômetro de bancada (ColorFlex45/0, HunterLab, Estados Unidos), com iluminante D65 ângulo do observador de 10°. Os valores absolutos de a^* e b^* foram determinados por meio do software Universal, versão 4.10. Os resultados foram expressos segundo o grau de intensidade ou saturação da cor (C^*) e a tonalidade da cor (ângulo hue – h) (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017).

3.2.4 Análise estatística

Os ensaios foram realizados em triplicata e submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey para comparação das médias, com nível de significância de 5%. Além disso, para ajustar os modelos matemáticos das isotermas foi aplicada a técnica de regressão não linear baseada no algoritmo de Levenberg-Marquardt, que estima os parâmetros dos modelos pelo método dos mínimos quadrados (MARQUARDT, 1963). A eficiência dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da média do erro relativo, em porcentagem, $P(\%)$, definida pela Equação 3.5 (LOMAURO; BAKSHI; LABUZA, 1985).

$$P(\%) = \left\{ \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y^{\text{exp}} - y^{\text{calc}}|}{y^{\text{exp}}} \right\} \quad (3.5)$$

em que:

y^{exp} = valor experimental;

y^{calc} = valor calculado;

n = número de observações.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Características do pó de acerola

Na Tabela 3.2 estão apresentadas as médias e os desvios-padrões referentes a molhabilidade (s) e solubilidade (%) dos pós de acerola, obtidos através da secagem em leito de espuma.

Tabela 3.2 – Valores médios de umidade ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pó), solubilidade (%) e molhabilidade (s) dos pós de acerola para diferentes tratamentos

Tratamento	Umidade ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pó)	Solubilidade (%)	Molhabilidade (s)
1%SPI_60°C	3,44±0,28 ^{bA}	63,17±0,75 ^{dB}	27±0,06 ^{dB}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_60°C	2,82±0,19 ^{cA}	68,98±1,77 ^{bA}	689±17,50 ^{cB}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_60°C	2,43±0,05 ^{cB}	68,94±1,92 ^{bcB}	2507±166,50 ^{bA}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_60°C	2,73±0,07 ^{cA}	63,80±3,18 ^{cdA}	3386±207,00 ^{aA}
Liofilizada	5,48±0,04 ^a	80,22±0,99 ^a	49±5,29 ^d
1%SPI_70°C	3,43±0,05 ^{bA}	68,94±2,08 ^{cA}	31±1,73 ^{dA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_70°C	3,19±0,18 ^{bcA}	71,37±0,11 ^{bcA}	843±41,40 ^{aA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_70°C	2,79±0,08 ^{cA}	73,16±1,36 ^{bA}	484±41,60 ^{cB}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_70°C	2,77±0,40 ^{cA}	63,28±0,44 ^{dA}	644±31,30 ^{bB}
Liofilizada	5,48±0,04 ^a	80,16±0,92 ^a	49±5,29 ^d

Sendo L=Lactem; D=Dimodan[®]; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística ($p<0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa liofilizada de acordo com teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p<0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1.1 Solubilidade

Os valores de solubilidade obtidos neste estudo variaram entre 63,17% e 73,16% para os pós com agentes espumantes e a polpa pura liofilizada gerou o pó mais solúvel, atingindo o valor de 80,22% (Tabela 3.2). Constata-se que os diferentes tipos de agentes espumantes influenciaram esse parâmetro. É esperado que a solubilidade do pó liofilizado seja superior à dos pós que contêm proteína, uma vez que as proteínas não são facilmente solubilizadas, especialmente quando os valores de pH estão próximos de seu ponto isoelétrico. Além disso, polpas de fruta, quando liofilizadas, tendem a ser bastante solúveis, uma vez que o processo de congelamento e a aplicação de vácuo facilitam a ruptura da estrutura celular e tornam o material mais amorfo, aumentando, assim, a solubilização de maior quantidade de sólidos presentes no tecido vegetal (RIBEIRO; COSTA; AFONSO, 2016).

Em relação aos agentes espumantes utilizados nas secagens a 60 °C, observou-se que a formulação somente com SPI e a formulação com CPP e maior concentração da mistura de L e D apresentaram as menores solubilidades. A formulação com SPI e a com CPP e menor concentração da mistura de L e D foram as mais solúveis e estatisticamente iguais, mas a solubilidade de ambas as formulações com CPP também não apresentou diferenças significativas nessa temperatura. Nas secagens a 70 °C, entretanto, a formulação somente com

SPI foi estatisticamente superior à mesma formulação seca a 60 °C, assim como a formulação com CPP e menor concentração de L e D. As demais não foram afetadas significativamente pela temperatura. A 70 °C a menor solubilidade foi a formulação com CPP e maior concentração de L e D, e as maiores foram as formulações com menor concentração de L e D, tanto para SPI quanto para CPP.

Todas as formulações, em ambas as temperaturas, foram menos solúveis que a amostra liofilizada. Sabe-se que a solubilidade é fortemente afetada pelos agentes espumantes adicionados, que impactam diretamente na composição química e estado físico dos pós (SALAH; MOHEBBI; TAGHIZADEH, 2017). No presente estudo, foi possível observar a influência da composição, com valores de solubilidade das formulações inferiores à do pó de polpa pura liofilizado, além da tendência de a solubilidade do pó com CPP e L e D na maior concentração ser menos solúvel que as demais formulações. A presença da SPI também parece diminuir a solubilidade dos pós, o que se relaciona à menor solubilidade dessa proteína, quando comparada com a CPP. De acordo com Aluko, Mofolasayo e Watts (2009), que comparou propriedades SPI com 90% de proteína e isolado proteico de ervilha com 82% de proteína, a composição do segundo, que tinha maior nível de carboidratos, conferiu-lhe maior solubilidade. Entretanto, as diferenças observadas no presente estudo são pequenas.

A temperatura de processo também apresentou pouca influência sobre a solubilidade dos pós, aumentando apenas a solubilidade da formulação com apenas SPI e a com CPP e mistura de L e D na menor concentração. Nunes et al. (2022) destaca que a temperatura de secagem não afetou estatisticamente a solubilidade de cenoura em pó obtida por secagem em leito de espuma, e acrescenta que a composição química e a condição física dos pós são fatores de maior influência sobre a solubilidade do que as condições de processo.

3.3.1.2 Molhabilidade

A molhabilidade é a capacidade de uma massa de pó ser penetrada por um líquido devido às forças capilares, estando diretamente relacionada ao tamanho das partículas, sendo que partículas maiores podem penetrar mais facilmente na água (FERRARI et al., 2012). Na Tabela 3.2, o parâmetro de molhabilidade para o pó de acerola obtido através da secagem em leito de espuma é apresentado, na qual se ressalta que tanto a temperatura quanto os agentes espumantes aplicados influenciaram a molhabilidade. Curiosamente as formulações que continham CPP apresentaram maior tempo de molhabilidade a 60 °C e menor a 70 °C, enquanto

as amostras com SPI apresentaram o inverso, isto é, o tempo de molhabilidade aumentou com a temperatura.

A influência do aumento da temperatura de secagem sobre a diminuição do tempo de molhabilidade para os tratamentos com CPP, podem ser justificados devido às temperaturas mais altas proporcionarem taxas de evaporação mais altas. Com isso, os produtos secam em uma estrutura mais porosa ou fragmentada, o que implica uma maior porosidade das espumas secas; logo, com o aumento da porosidade devido à maior área de superfície específica, o tempo de dissolução pode ser diminuído (SALAH; MOHEBBI; TAGHIZADEH, 2017).

Observa-se que não há diferença significativa entre as amostras com a polpa liofilizada e com as que contêm em sua formulação apenas SPI, independentemente da temperatura em estudo, sendo que para as outras formulações, em todas as temperaturas houve diferença. Caliskan e Dirim (2013) explicam que, além dos efeitos da porosidade e do tamanho das partículas, a composição química dos pós também influencia a molhabilidade, que depende do teor de gorduras, proteínas e carboidratos sobre a superfície das partículas.

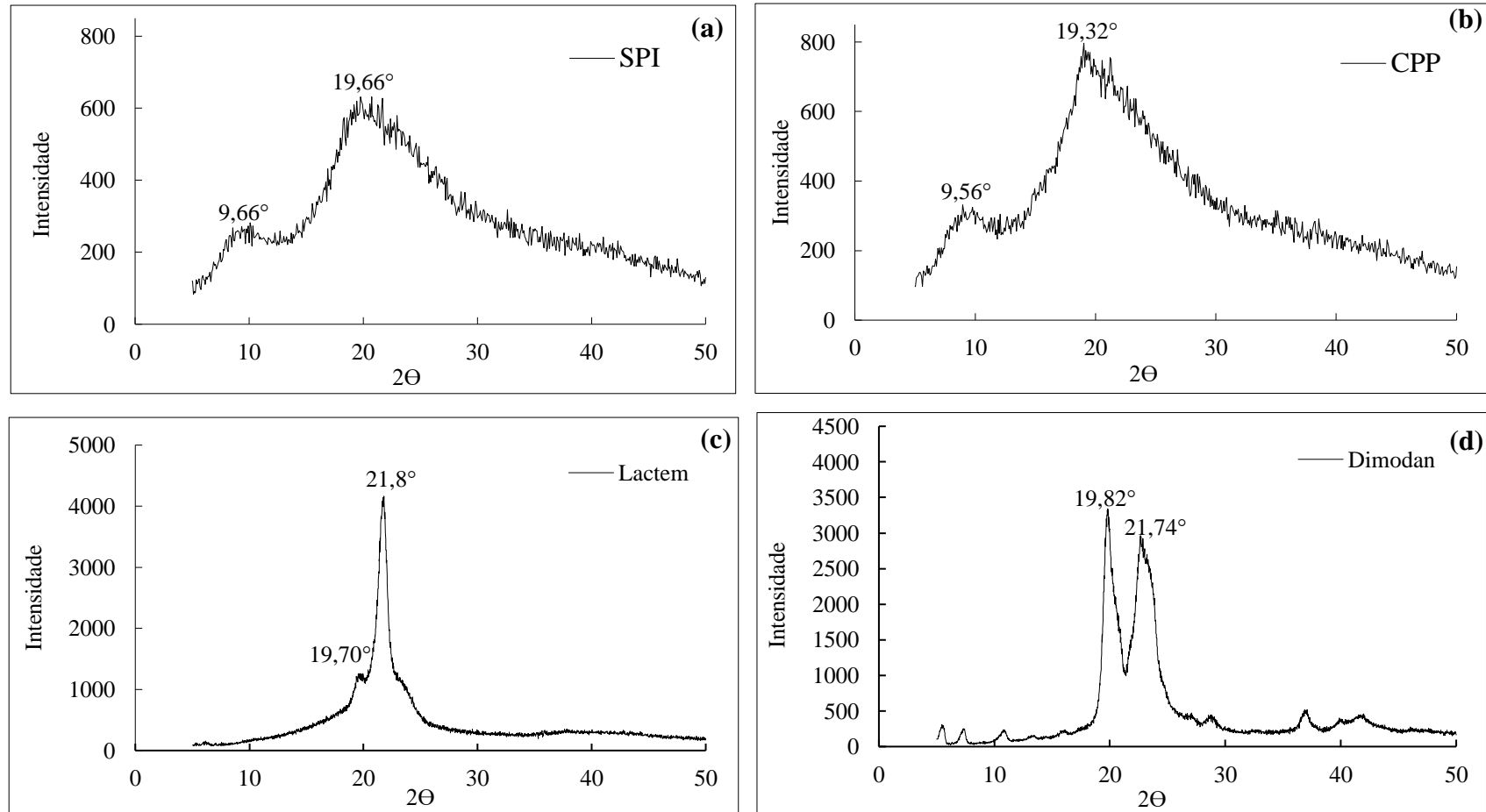
A similaridade da molhabilidade do pó formulado apenas com SPI e do pó de acerola pura liofilizada sugere que os agentes espumantes à base de ésteres de ácidos graxos aumentaram o tempo de molhabilidade desses dos pós, possivelmente pelo fato de as partículas dos primeiros apresentarem mais grupos apolares sobre sua superfície do que aquelas que contêm ésteres de ácidos graxos.

3.3.2 Cristalinidade relativa

A difração de raios-X é uma técnica comum usada para confirmar o estado cristalino-amorfo de produtos secos em forma de pó, sendo que os materiais cristalinos são caracterizados por picos bem definidos com pontos máximos bastante acentuados e pontiagudos, apresentados de forma altamente ordenada; por outro lado, materiais amorfos apresentam picos difusos e elevados devido às suas moléculas desordenadas, produzindo, assim, bandas dispersas (WATHARKAR et al., 2021).

A Figura 3.1 ilustra os difratogramas dos agentes espumantes em pó empregados na formação da espuma de acerola. Os difratogramas das proteínas SPI e CPP mostraram características de estruturas com baixo grau de cristalinidade. O pó de SPI revelou um pico proeminente a $19,66^\circ$, correspondente à α -hélice, e um pico discreto em $9,66^\circ$, que pode ser atribuído à folha- β da estrutura secundária da proteína (XIA et al., 2015).

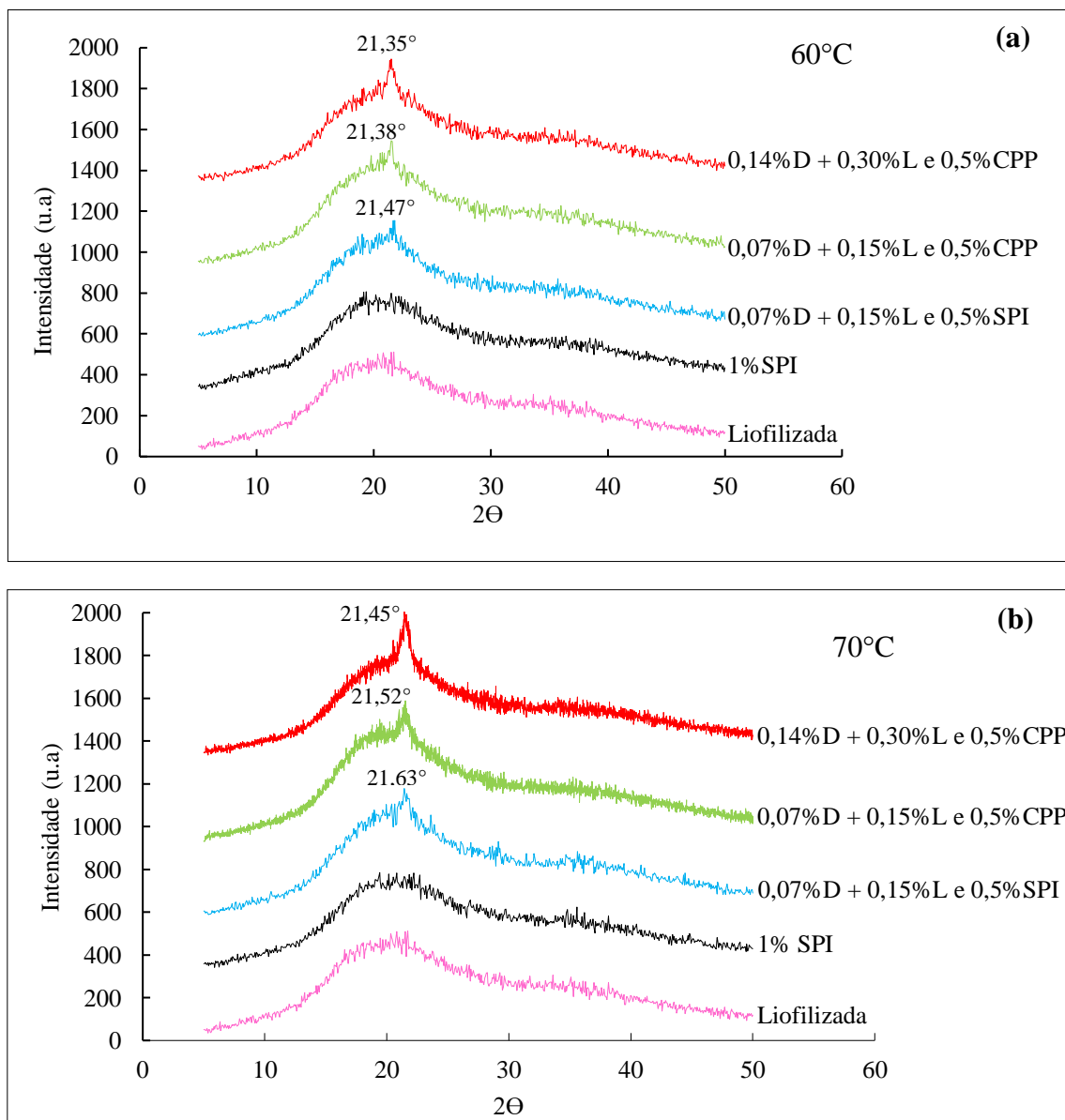
Observou-se que os pós dos agentes espumantes L e D apresentaram um comportamento típico de materiais cristalinos, com picos claramente definidos em $21,8^{\circ}$ para o caso do Lactem, e $19,82^{\circ}$ e $21,74^{\circ}$ para o Dimodan[®].

Figura 3.1 – Espectro de raio X dos aditivos em pó sendo SPI (a), CPP (b), Lactem (c) e Dimodan[®] (d)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os difratogramas dos pós de acerola produzidos com os diferentes agentes espumantes e polpa pura liofilizada (controle) são apresentados na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Espectro de raio-X dos pós de acerola produzidos com diferentes agentes espumantes submetidos a condições de secagem a 60 °C (a) e 70 °C (b)



Fonte: Elaborado pelo autor

Verificou-se que os difratogramas obtidos para os pós de acerola são característicos de materiais amorfos, independentemente da temperatura e dos agentes espumantes utilizados. Observa-se alguma intensificação dos halos amorfos com a presença de L e D na maior concentração, especialmente a 70 °C. Quanto à estabilidade dos pós, o estado cristalino é preferível, pois quando o pó se encontra no estado amorfo, serm é muito higroscópico, com a tendência de se se tornar pegajoso e de formar

aglomerados, o que é intensificado à medida que o açúcar no estado amorfo se transforma em cristal, liberando pequenas quantidades de água que aumentam a pegajosidade (AMAMI et al., 2017). A presença de proteínas pode reduzir a capacidade dos açúcares de formarem pontes de hidrogênio intermoleculares entre si, podendo ser resultado da formação de pontes de hidrogênio entre proteínas e carboidratos, o que afeta a ocorrência de cristalização (CARPENTER; CROWE, 1989; CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017).

Outro fator que pode estar relacionado a um arranjo desordenado das moléculas nas amostras da polpa de acerola, típico de materiais amorfos, foi a aplicação de temperaturas relativamente baixas utilizadas na secagem, que não favorecem a cristalização dos açúcares presentes na fruta (AMAMI et al., 2017; CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017).

Pós de frutas com características amorfas foram observados para a secagem em leite de espuma da polpa de biribá (SOUZA et al., 2022), polpa de banana (WATHARKAR et al., 2021) e polpa de manga (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017).

A Tabela 3.3 apresenta a cristalinidade relativa dos agentes espumantes puros em pó SPI, CPP, D e L, além dos pós de acerola obtidos por secagem em leite de espuma a 60 e 70 °C, utilizando diferentes concentrações desses aditivos.

Tabela 3.3 – Cristalinidade relativa das matérias-primas e dos pós de acerola

Formulação	Cristalinidade relativa (%)
SPI em pó	44,23±0,34
CPP em pó	44,32±0,41
Lactem em pó	58,46±0,51
Dimodan em pó	70,77±0,18
1%SPI_60°C	49,71±0,42 ^{bA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_60°C	51,06±0,75 ^{abA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_60°C	51,08±0,16 ^{abA}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_60°C	51,63±0,51 ^{aB}
Liofilizada	52,07±0,69 ^a
1%SPI_70°C	50,34±0,72 ^{cA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_70°C	50,30±0,93 ^{cA}
0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP_70°C	50,98±0,52 ^{bcA}
0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP_70°C	54,05±0,55 ^{aA}
Liofilizada	52,07±0,69 ^b

Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa liofilizada de acordo com teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar a influência dos aditivos na cristalinidade relativa (Tabela 3.3), constatou-se que, na temperatura de 60 °C, apenas o tratamento contendo SPI em sua composição apresentou cristalinidade estatisticamente inferior àquela da polpa liofilizada. Entretanto, ao elevar a temperatura para 70 °C, a formulação que continha maiores quantidades de L e D apresentou cristalinidade superior à polpa liofilizada, e aquela que era composta apenas por SPI teve cristalinidade significativamente inferior à mesma polpa controle.

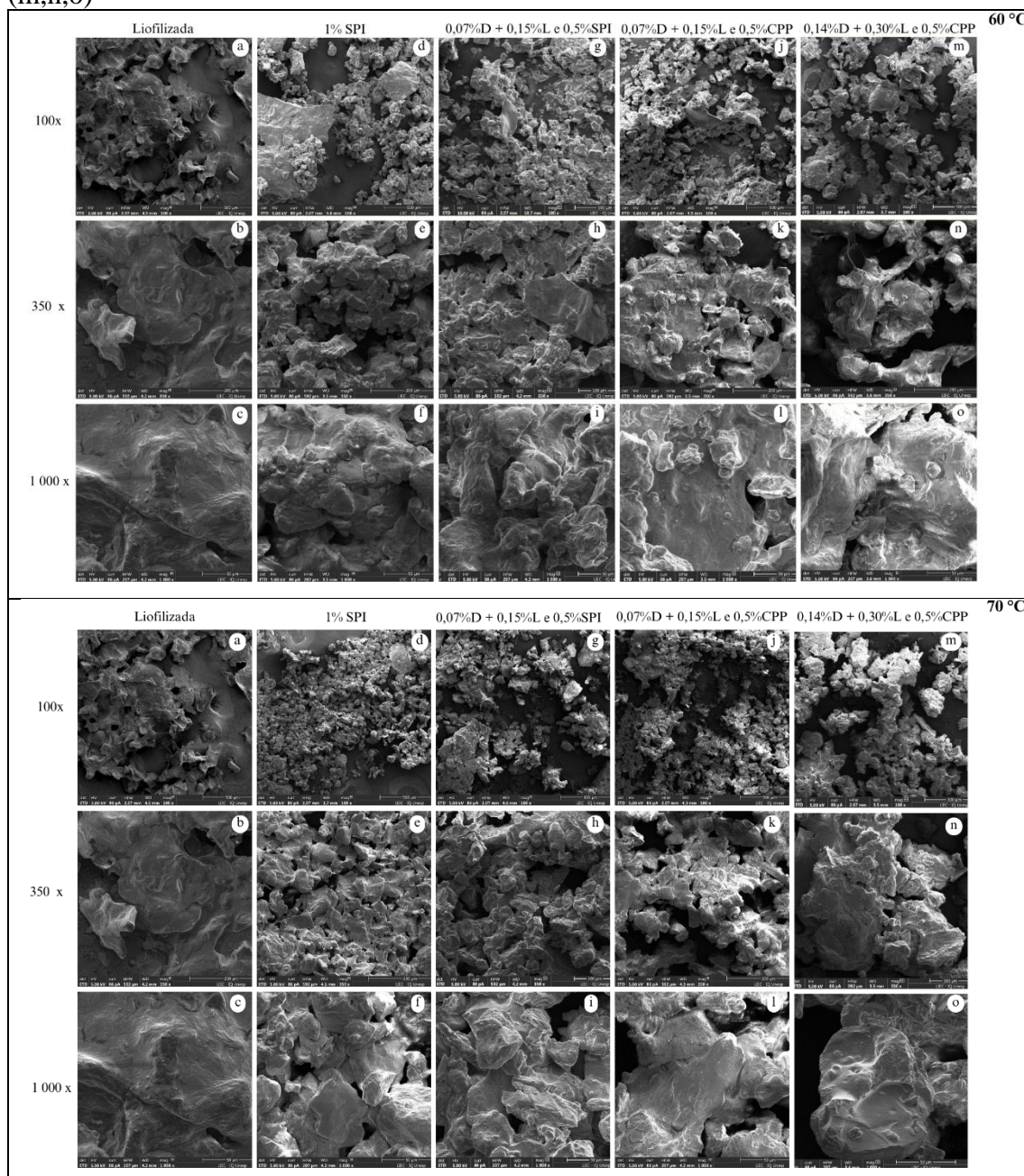
A cristalinidade relativa foi influenciada pela variação da temperatura de secagem apenas na formulação que continha CPP com as maiores quantidades de L e D, a qual apresentou um aumento na cristalinidade a 70 °C.

3.3.3 Morfologia dos pós

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) desempenha um papel fundamental na caracterização dos pós de alimentos, fornecendo informações importantes sobre sua morfologia, as quais podem subsidiar interpretações relacionadas, por exemplo, à estrutura ou a interações com a água. Essa técnica tem sido amplamente utilizada para investigar características de alimentos em pó (CAPARINO et al, 2012; CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017; TONON, FREITAS, HUBINGER, 2011).

A Figura 3.3 apresenta imagens do pó de polpa pura liofilizado e dos pós da polpa de acerola obtidos por meio da secagem em leito de espuma, utilizando diferentes agentes espumantes de origem vegetal e temperaturas de secagem de 60 e 70 °C.

Figura 3.3 – Micrografias MEV do pó de polpa pura liofilizado (a, b, c) e dos pós obtidos por secagem em leito de espuma a 60 e 70 °C: 1%SPI (d, e, f), 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI (g, h, i), 0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP (j, k, l) e 0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP (m,n,o)



Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Fonte: Elaborado pelo autor

O pó de polpa pura liofilizada (Figura 3.3a, 3.3b e 3.3c) apresenta um aspecto de fluidez como se as partículas estivessem sofrendo um processo de solubilização e formando uma superfície contínua, recobrando parcialmente as partículas. Esse aspecto

sugere que as partículas são bastante higroscópicas, o que se deve ao elevado conteúdo de sólidos solúveis em relação aos sólidos totais, e que o material apresenta pegajosidade.

O aspecto das misturas, por outro lado, é de um pó um pouco mais solto do que o liofilizado (Figuras 3.3d, 3.3g, 3.3j e 3.3m), no aumento de 100×. Entretanto, quando a imagem é ampliada para 350× ou 1000×, observa-se que sobre as superfícies parece haver uma fina camada de material fundido, que estaria contribuindo para formar aglomerados com pequenas partículas. A temperatura maior reduziu de forma bastante sutil o tamanho dos aglomerados, com exceção da formulação com maior concentração de L e D. A comparação é mais visível nas ampliações de 350× ou 1000×, que mostram mais separações entre os aglomerados, na maior temperatura.

3.3.4 Isotermas de sorção de água

Isoterma de alimentos descrevem a relação termodinâmica de equilíbrio entre a atividade da água e o conteúdo de água de um produto alimentício à temperatura e pressão constantes, a fim de obter informações sobre armazenamento adequado, previsões de qualidade, estabilidade e requisitos de embalagem na manipulação de alimentos (AYETIGBO et al., 2023).

Na Tabela 3.4, são apresentadas as constantes e os parâmetros estatísticos dos modelos de GAB, BET e Oswin ajustados aos dados experimentais de sorção de água dos pós de acerola obtidos na secagem em leito de espuma. A avaliação dos ajustes se baseou nos modelos que apresentaram coeficientes de determinação (R^2) próximos a 1, erro relativo médio percentual (%P) <10 e menores valores de qui-quadrado (χ^2) (MOHAPATRA; RAO, 2005).

Tabela 3.4 – Valores estimados dos parâmetros de coeficientes de determinação (R^2), erro relativo médio porcentual (%P) e qui-quadrado (χ^2) para os diferentes modelos de sorção aplicados aos dados experimentais dos pós de acerola obtidos por secagem a 70 °C

Modelos	Parâmetros	Liofilizada	1% SPI	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI	0,07%D + 0,15%L e 0,5%CPP	0,14%D + 0,30%L e 0,5%CPP
GAB	R^2	0,998	0,992	0,995	0,998	0,998
	P (%)	2,69	10,21	6,07	5,57	5,16
	χ^2	1,90E ⁻⁰⁵	7,66E ⁻⁰⁵	7,32E ⁻⁰⁵	2,78E ⁻⁰⁵	2,38E ⁻⁰⁵
	X_m	0,065	0,069	0,086	0,105	0,102
	C	7,729	2,986	2,715	2,196	2,011
	K	1,027	0,993	0,997	0,929	0,932
BET	R^2	0,998	0,992	0,995	0,996	0,996
	P (%)	3,92	10,43	5,90	4,70	4,57
	χ^2	7,69E ⁻⁰⁵	7,69E ⁻⁰⁵	7,33E ⁻⁰⁵	5,36E ⁻⁰⁵	4,31E ⁻⁰⁵
	X_m	0,071	0,068	0,085	0,081	0,078
	C	5,861	3,143	2,798	3,544	3,159
OSWIN	R^2	0,992	0,991	0,995	0,998	0,998
	P (%)	8,62	10,48	6,31	3,82	3,49
	χ^2	7,95E ⁻⁰⁵	8,47E ⁻⁰⁵	7,04E ⁻⁰⁵	2,44E ⁻⁰⁵	2,16E ⁻⁰⁵
	a	0,124	0,103	0,126	0,128	0,120
	b	0,697	0,775	0,796	0,748	0,768

Onde C, K, a, b são constantes; X_m é o conteúdo de água em base seca na monocamada (kg de água·kg⁻¹ de matéria seca).

Observa-se que todos os modelos apresentaram coeficientes de determinação próximos de 1 ($R^2 \geq 0,99$) e desvios relativos médios (%P) menores que 10,5%, valores que representam bom ajuste dos modelos (MOHAPATRA; RAO, 2005), podendo estes serem utilizados para prever as isotermas de adsorção de água do pó de acerola.

Os valores de K para os pós contendo SPI foram muito próximos de 1, o que aproxima o modelo de GAB ao modelo de BET. A constante K para a polpa liofilizada, ainda que próxima de um, apresentou um pequeno desvio em relação ao esperado, uma vez que seu valor superou em 2,7% a unidade. Neste caso, X_m diferiu 9% entre os dois modelos. Os valores de K para as formulações que continham SPI também foram muito próximos à unidade, sendo que X_m foi praticamente o mesmo e os valores de C diferiram não mais que 5,2%. Porém, nas formulações com CPP, as diferenças de X_m entre os dois modelos chegaram a 28% e os valores de C também apresentaram maiores discrepâncias.

Deste modo, o modelo de GAB representou bem a sorção de água dos pós de ervilha. A equação de GAB é um refinamento do modelo de BET e compartilha com ele as duas constantes, X_m , a capacidade da monocamada e C, uma constante de energia. Sua maior versatilidade se deve à introdução de uma terceira constante (K), que mede a diferença de potencial químico entre a água pura e a sorvida nas multicamadas (TIMMERMANN, 2003). Além disso, GAB é uma equação fundamental para a caracterização da sorção de água de materiais alimentares, pois seus parâmetros possuem significado físico e sua função consegue representar os dados experimentais na faixa de atividade de água de maior interesse prático em alimentos, ou seja, de 0,10 a 0,90 (TIMMERMANN; CHIRIFE; IGLESIAS, 2001).

De acordo com Lewicki (1997), as constantes do modelo de GAB devem estar dentro das faixas de valores ($0,24 < K \leq 1$) e ($5,67 \leq C < \infty$) para que a equação apresente forma sigmoideal e que a monocamada seja estimada com um erro no máximo de 15,5%. Apesar dos bons ajustes obtidos com o modelo de GAB, nenhum dos ajustes preencheu plenamente os requisitos de Lewicki (1997), o que significa que a determinação da capacidade de sorção da monocamada pode apresentar erro superior a 15,5%.

O parâmetro C, que determina a força de ligação das moléculas de água aos sítios primários na superfície do alimento, será tanto maior quanto mais fortemente for a ligação da água na monocamada e maior a diferença de entalpia entre as moléculas de monocamada e as moléculas de multicamada (QUIRIJNS et al., 2005). Os valores C mais baixos foram obtidos para os tratamentos com os diferentes aditivos aplicados na secagem em leito de espuma, demonstrando uma menor capacidade de ligação de água em comparação com a polpa liofilizada.

O valor do teor de umidade da monocamada (X_m) indica a quantidade de água que é fortemente adsorvida a locais específicos na superfície do alimento, a qual não participa de reações e é muito difícil de ser eliminada pela secagem, sendo referida também como água não congelável (ALVES; FÓZ; NICOLETI, 2015). Dessa maneira, a deterioração dos produtos alimentícios é menor quando eles são armazenados com teores de água inferiores ao da monocamada, uma vez que as taxas de reação de deterioração são muito baixas abaixo desse valor (MACIEL et al., 2020).

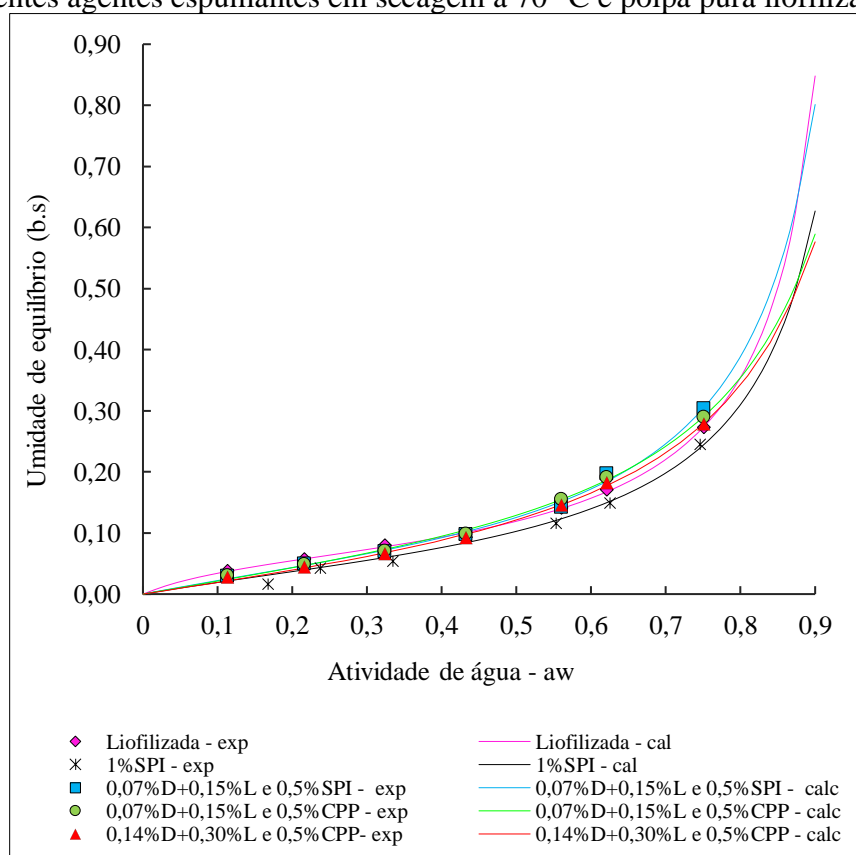
O teor de água da monocamada dos pós de acerola obtidos neste estudo encontra-se em uma faixa de 0,065 a 0,105 kg de água·kg⁻¹ de sólidos secos, sendo que as formulações contendo apenas SPI e polpa liofilizada apresentaram os menores valores deste parâmetro, sendo os mais suscetíveis à deterioração. As umidades dos pós processados, no entanto, atingiram valores inferiores a X_m em todos os casos (Tabela 3.2), sendo que nas formulações o valor máximo foi 0,344 kg de água·kg⁻¹ de pó, ou 0,356 kg de água·kg⁻¹ de sólidos secos. Entretanto, a umidade do pó de acerola foi 0,548 kg de água·kg⁻¹ de pó, ou 0,580 kg de água·kg⁻¹ de sólidos secos, valor muito próximo de X_m , que foi 0,065 kg de água·kg⁻¹ de sólidos secos (Tabela 3.4). Os valores de X_m encontrados na presente pesquisa encontram-se na faixa daqueles determinados por Chaux-Gutiérrez et al. (2017) em um estudo semelhante para o pó de espuma de manga, onde os agentes espumantes foram albumina e uma mistura de monoglicerídeos de ácidos graxos, monoesterato de sorbitana e monoesterato de polioxietileno de sorbitana. Na pesquisa, X_m variou de 0,053 a 0,11 kg de água·kg⁻¹ de sólidos secos, sendo que os autores atribuíram essas diferenças à composição das formulações dos pós, isto é, do tipo e quantidade de aditivos utilizados.

Neste contexto, foi observado que as formulações contendo L e D apresentaram X_m maior em comparação com os que não possuíam esses aditivos em sua formulação, o que pode ser devido a esses agentes espumantes propiciarem a formação de maior área superficial, a qual disponibilizaria mais sítios de ligação com a água, retendo, assim, mais moléculas de água na monocamada sobre as superfícies.

As isotermas dos diferentes pós obtidos pela secagem em leito de espuma da polpa de acerola foram representadas pelo modelo de GAB na Figura 3.4. As curvas mostraram um padrão de isoterma entre os tipos II e III (levemente sigmoidal), conforme a classificação de Brunauer et al. (1940). Constata-se, na faixa de a_w 0,35-0,45, uma leve inflexão, característica de alimentos que contêm polímeros, cujas macromoléculas podem reter água fortemente ligada por meio de ligações de hidrogênio, sendo que a partir daí, conforme a atividade de água aumenta, ocorre um crescimento acentuado da umidade de equilíbrio, característico de produtos

higroscópicos (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017), como é o caso das frutas, que apresentam elevado teor de açúcares em relação aos sólidos totais. Os tratamentos influenciaram pouco as diferentes isotermas, mas nota-se a tendência do pó com apenas SPI apresentar menor associação com a água em toda a faixa de umidade, em comparação com os demais pós, enquanto os pós contendo D e L apresentaram maiores umidades de equilíbrio, assim como o pó de polpa pura liofilizada.

Figura 3.4 – Comparação entre umidade de equilíbrio experimental e calculada de acordo com o modelo de GAB (Equação 3.3) para pós de polpa de acerola obtidos com diferentes agentes espumantes em secagem a 70 °C e polpa pura liofilizada (controle)

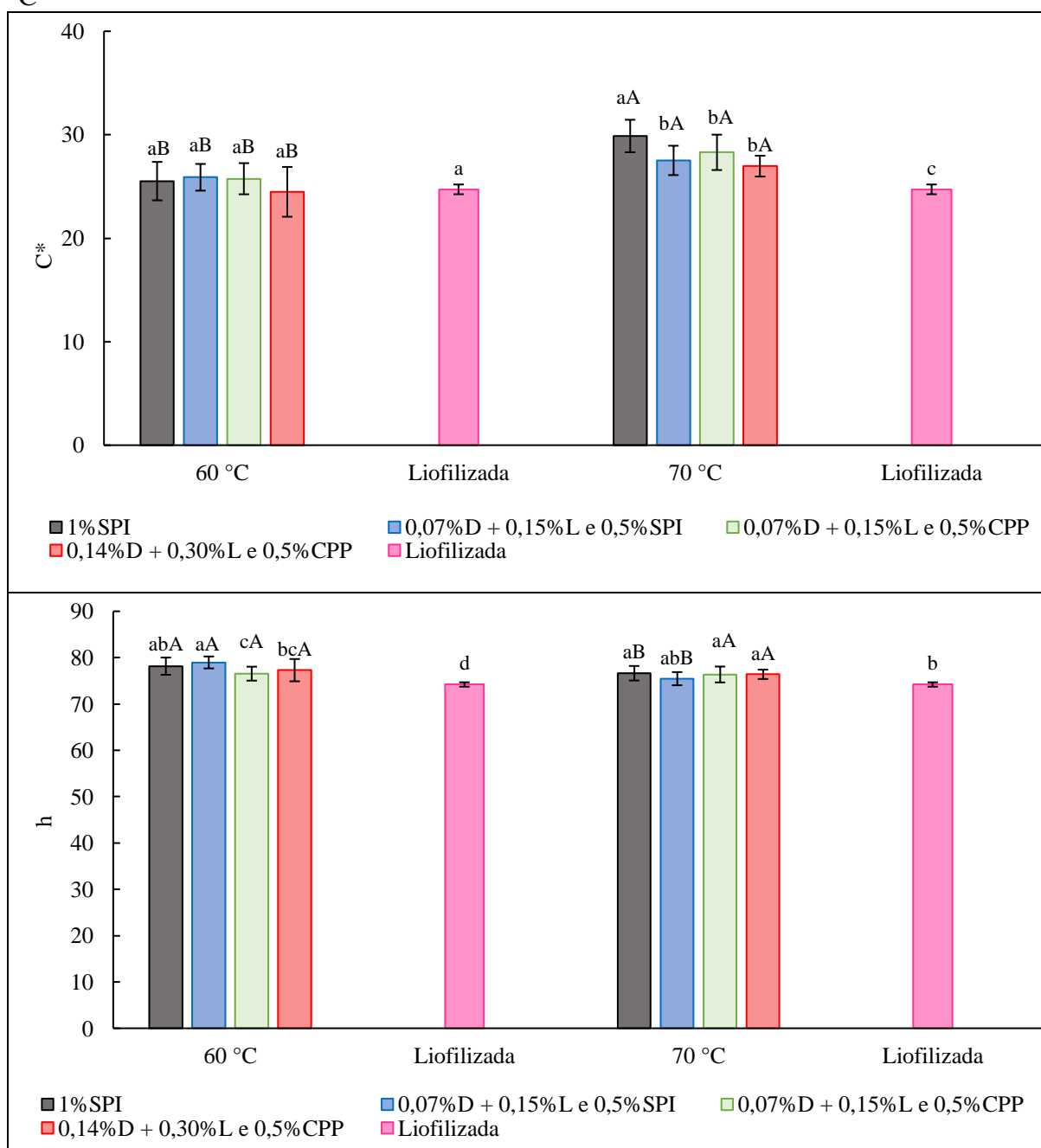


Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.5 Cor dos pós reconstituídos

A cor é uma propriedade fundamental na percepção da qualidade de um produto, sendo um dos primeiros atributos avaliados pelo consumidor. Uma forma de avaliar a percepção do consumidor em relação à cor dos pós obtidos através da secagem em leite de espuma é reconstituí-los em água. Para tanto, avaliou-se o parâmetro croma (C^*), que indica a intensidade ou saturação da cor (Figura 3.5a.), juntamente com o ângulo hue (h), que representa a tonalidade da cor (Figura 3.5b) (CHAUX-GUTIÉRREZ et al., 2017).

Figura 3.5 – Parâmetros de cor dos pós reconstituídos obtidos por diferentes formulações, incluindo a liofilização e a secagem em leito de espuma, utilizando temperaturas de 60 °C e 70 °C



Sendo L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja; CPP= Concentrado da proteína de ervilha. Letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras na mesma temperatura e polpa pura de acordo com o teste de Tukey.

Letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística ($p < 0,05$) entre amostras de mesma composição e temperaturas diferentes de acordo com o teste de Tukey.

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do parâmetro croma (Figura 3.5a) revelou diferenças estatisticamente significativas entre os pós obtidos nas duas temperaturas de secagem em leito de espuma, para todas as formulações. Os resultados indicam que os valores obtidos na temperatura de 70 °C

foram significativamente maiores do que a 60 °C. Por outro lado, na temperatura de 60 °C, os valores de croma de todas as formulações não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si e em relação ao pó obtido por liofilização. No caso da temperatura de 70 °C, o pó preparado apenas com SPI apresentou intensidade significativamente maior que os demais, e todas as formulações tiveram o croma superior ao pó de polpa liofilizada, sugerindo que a temperatura intensificou a cor das formulações.

Em relação ao ângulo hue (Figura 3.5b), constata-se que os valores ficaram entre 60 e 70°, o que caracteriza a cor laranja amarelada. Foi observado que o pó de polpa liofilizada apresentou, quase que na totalidade, valores ligeiramente mais baixos do que os pós das formulações, o que significa que estes últimos apresentaram tonalidades menos avermelhadas que o liofilizado (SEERANGURAYA et al. 2018).

Ao analisar a influência dos aditivos nos pós desidratados a 60 °C, verificaram-se pequenas diferenças, porém significativas, entre as formulações. Nas formulações com a mesma concentração de L e D, porém, com as diferentes proteínas, constatou-se que as com SPI apresentaram valores mais elevados de ângulo hue em comparação com aquelas CPP. Na temperatura de 70 °C, apenas o tratamento com SPI contendo a mistura de L e D não apresentou diferença significativa em relação ao pó obtido por liofilização.

Ao investigar o efeito da temperatura sobre o ângulo hue, constatou-se que apenas as formulações com SPI na composição foram afetadas, sendo que ele foi ligeiramente menor na temperatura de 70 °C do que a 60 °C.

3.4 CONCLUSÃO

Os agentes espumantes reduziram a solubilidade dos pós em relação à polpa liofilizada, o que foi atribuído aos aditivos, menos solúveis que os constituintes naturais da fruta. A temperatura de secagem também afetou significativamente a solubilidade dos pós à base de SPI e de CPP com mistura de L e D na menor concentração, que aumentou ligeiramente com o aumento da temperatura.

A molhabilidade do pó de acerola foi influenciada pela temperatura e pelos agentes espumantes adicionados. A formulação com apenas SPI apresentou os menores tempos de molhabilidade, comparáveis com o tempo da polpa pura liofilizada. O aumento da temperatura de secagem diminuiu o tempo de molhabilidade para as formulações com CPP mas aumentou ligeiramente esse tempo para os pós com SPI.

Os difratogramas do pó de acerola mostraram padrões de materiais amorfos, independentemente da temperatura e dos agentes espumantes utilizados. A temperatura de 70 °C aumentou ligeiramente a cristalinidade apenas do pó formulado com CPP e mistura de L e D na maior concentração, em relação à mesma formulação secada a 60 °C.

A morfologia das partículas dos pós liofilizados demonstrou a elevada higroscopicidade das partículas, que se agregaram e apresentaram aspecto de solubilização parcial do material, devido ao seu elevado teor de açúcar. A elevação da temperatura de secagem influenciou pouco o aspecto das partículas, sendo que, excetuando-se a formulação com maior concentração de L e D, houve uma redução sutil dos aglomerados das formulações comparativamente à secagem a 60 °C.

O modelo de GAB foi bem ajustado às isotermas, sendo que para os pós à base de SPI o modelo de GAB foi quase equivalente ao de BET, com K aproximadamente 1. O pó de acerola obtido mostrou-se adequado para armazenamento, com valores de umidade da monocamada superiores às umidades dos pós desidratados pela secagem, o que garante maior estabilidade. As isotermas de adsorção de água dos pós de acerola apresentaram funções levemente sigmoidais, características dos modelos de BET e GAB, sendo que com o aumento da atividade de água, houve um crescimento acentuado da umidade de equilíbrio. Essas curvas foram classificadas entre o tipo II e o tipo III, típicas de alimentos com presença de polímeros e alto teor de açúcar.

Os pós reconstituídos em água apresentaram pequenas diferenças de intensidade e de tonalidade de cor em função das formulações e das temperaturas de secagem. A intensidade da cor dos pós secados a 70 °C foi superior à dos pós submetidos a 60 °C e, na maior temperatura, as formulações também apresentaram croma superior àquele do pó de polpa liofilizada. Por sua vez, este último teve sua tonalidade mais preservada, um pouco mais avermelhada que a grande maioria das formulações.

Conforme os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que todos os agentes espumantes são viáveis para a elaboração de espumas, e que podem ser dosados de forma a obter pós com características desejáveis, sendo que os pós com SPI obtidos através da secagem em leito de espuma a 70 °C mostraram-se uma opção promissora e eficiente para processar a polpa de acerola, resultando em um alimento ou ingrediente alimentar com características desejáveis.

3.5 REFERÊNCIAS

ABD EL-SALAM, E.A.E.S.; ALI, A.M.; HAMMAD, K.S. Foaming process optimization, drying kinetics and quality of foam mat dried papaya pulp. **Journal of Food Science and Technology**, v. 58, p. 1449-1461, 2021.

ALUKO, R. E.; MOFOLASAYO, O. A.; WATTS, B. M. Emulsifying and foaming properties of commercial yellow pea (*Pisum sativum* L.) seed flours. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 57, n. 20, p. 9793-9800, 2009.

ALVES, T. P.; FÓZ, H. D.; NICOLETI, J. F. Isothermas de dessecção de pimentão verde e energia envolvida no processo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 18, p. 137-145, 2015.

AMAMI, E.; KHEZAMI, W.; MEZRIGUI, S.; BADWAIK, L. S.; BEJAR, A. K.; PEREZ, C. T.; KECHAOU, N. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 36, p. 286-300, 2017.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 16th ed., Washington, DC.: Chemists, 1995.

AYETIGBO, O.; LATIF, S.; IDRIS, W.; MÜLLER, J. Physical properties of white-fleshed and yellow-fleshed cassava (*Manihot esculenta*) foam powder. **Powder Technology**, v. 420, p. 118366, 2023.

BAZOCHE, P.; GUINET, N.; PORET, S.; TEYSSIER, S. Does the provision of information increase the substitution of animal proteins with plant-based proteins? An experimental investigation into consumer choices. **Food Policy**, v. 116, p. 102426, 2023.

BHATTA, S.; STEVANOVIC JANEZIC, T.; RATTI, C. Freeze-drying of plant-based foods. **Foods**, v. 9, n. 1, p. 87, 2020.

BELWAL, T.; DEVKOTA, H. P.; HASSAN, H. A.; AHLUWALIA, S.; RAMADAN, M. F.; MOCAN, A.; ATANASOV, A. G. Phytopharmacology of Acerola (*Malpighia* spp.) and its potential as functional food. **Trends in food science & technology**, v. 74, p. 99-106, 2018.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical society**, v. 62, n. 7, p. 1723-1732, 1940.

CALISKAN, G.; DIRIM, S. N. The effects of the different drying conditions and the amounts of maltodextrin addition during spray drying of sumac extract. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 4, p. 539-548, 2013.

CARPENTER, J. F.; CROWE, J. H. An infrared spectroscopic study of the interactions of carbohydrates with dried proteins. **Biochemistry**, v. 28, n. 9, p. 3916-3922, 1989.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao' var.*) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 1, p. 135-148, 2012.

CHAUX-GUTIÉRREZ, A. M.; PÉREZ-MONTERROZA, E. J.; TELIS, V. R. N.; MAURO, M. A. The physical and morphological characteristics of mango powder (*Mangifera indica* L. cv Tommy Atkins) produced by foam mat drying. **Food Biophysics**, v. 12, p. 69-77, 2017.

DARNIADI, S.; HO, P.; MURRAY, B.S. Comparison of blueberry powder produced via foam-mat freeze-drying versus spray-drying: evaluation of foam and powder properties, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v, 98, n, 5, p, 2002-2010, 2017.

DEHGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. **Powder technology**, v. 328, p. 470-484, 2018.

EL-TINAY. A.; ISMAIL, I.A. Effects of some additives and processes on the characteristics of agglomerated and granulated spray-dried roselle powder. **Acta Alimentaria**, v, 14, n, 3, p, 283-295, 1985.

FERRARI, C. C.; GERMER, S. P. M.; ALVIM, I. D.; VISSOTTO, F. Z.; DE AGUIRRE, J. M. Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 6, p. 1237-1245, 2012.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards. A. Physics and Chemistry**, v. 81A, n. 1, p. 89-96, 1977.

HAYAKAWA, K; TANAKA, K.; NAKAMURA, T.; ENDO, S.; HOSHINO, T. Quality Characteristics of Waxy Hexaploid Wheat (*Triticum aestivum* L.): Properties of Starch Gelatinization and Retrogradation. **Cereal Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 576-580, 1997.

KOKOSZKA, S.; DEBEAUFORT, F.; HAMBLETON, A.; LENART, A.; VOILLEY, A. Protein and glycerol contents affect physico-chemical properties of soy protein isolate-based edible films, **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v, 11, n, 3, p, 503-510, 2010.

LEWICKI, P. P. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. **International journal of food science & technology**, v. 32, n. 6, p. 553-557, 1997.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. **LWT – Food Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 111-117, 1985.

MA, K. K.; GREIS, M.; LU, J.; NOLDEN, A. A.; MCCLEMENTS, D. J.; KINCHLA, A. J. Functional performance of plant proteins. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 594, 2022.

MACIEL, R. M.; AFONSO, M. R.; DA COSTA, J.; ARAÚJO, T. M. Influence of albumin on guava pulp powder obtained by foam-mat drying. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 388-395, 2020.

MARTÍNEZ-ZAMORA, L.; PEÑALVER, R.; ROS, G.; NIETO, G. Substitution of synthetic nitrates and antioxidants by spices, fruits and vegetables in *Clean label* Spanish chorizo. **Food Research International**, v. 139, p. 109835, 2021.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MOLINA FILHO, L.; GONÇALVES, A. K. R.; MAURO, M. A.; FRASCARELI, E. C. Moisture sorption isotherms of fresh and blanched pumpkin (*Cucurbita moschata*). **Food Science and Technology**, v. 31, p. 714-722, 2011.

MATUDA, T. G.; HOSHINO, L. M.; RIBEIRO, E. P.; TADINI, C. C. The influence of polydextrose on freeze-dried unripe acerola (*Malpighia emarginata* DC.) by the concept of a state diagram. **Journal of Food Engineering**, v. 341, p. 111349, 2023.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

NUNES, G.; NASCIMENTO, B. S.; LIMA-CORRÊA, R. A. Development of carrot top powders using foam mat drying. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 46, n. 4, p. e16487, 2022.

ONWEZEN, M. C.; BOUWMAN, E. P.; REINDERS, M. J.; DAGEVOS, H. A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. **Appetite**, v. 159, p. 105058, 2021.

QUIRIJNS, E. J.; VAN BOXTEL, A. J.; VAN LOON, W. K.; VAN STRATEN, G. Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, n. 11, p. 1805-1814, 2005.

RIBEIRO, L. C.; COSTA, J.; AFONSO, M. R. Hygroscopic behavior of lyophilized acerola 109ode 109oder. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 269-274, 2016.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. (Eds.). 2th ed. **Engineering Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker, 1995. P. 223-309.

SALAH, M. R.; MOHEBBI, M.; TAGHIZADEH, M. Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) pulp powder using foam-mat drying method: Effects of drying conditions on microstructural of mat and physicochemical properties of powder. **Drying Technology**, v. 35, n. 15, p. 1897-1908, 2017.

SEERANGURAYAR, T.; MANICKAVASAGAN, A.; AL-ISMAILI, A. M.; AL-MULLA, Y. A. Effect of carrier agents on physicochemical properties of foam-mat freeze-dried date powder. **Drying Technology**, v. 36, n. 11, p. 1292-1303, 2018.

SOUZA, J. C. M.; DE AQUINO, F. B.; DA COSTA SANTOS, D.; DE LIMA FERREIRA, J. P.; DA SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M.; SANTIAGO, A.M.; DE LIMA, T. L. B. Effects of foam-mat drying temperature on

thermodynamic properties, microstructural properties, and X-ray diffraction of Biribá (*Rollinia mucosa* [Jacq.] Baill) pulp. **Journal of Food Process Engineering**, p. e14210, 2022.

TIMMERMANN, E. O. Multilayer sorption parameters: BET or GAB values?. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 220, n. 1-3, p. 235-260, 2003.

TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. WATER sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 1, p. 19-31, 2001.

TONON, R. V.; FREITAS, S. S.; HUBINGER, M. D. Spray drying of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice: Effect of inlet air temperature and type of carrier agent. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, n. 5, p. 691-700, 2011.

XIA, C.; WANG, L.; DONG, Y.; ZHANG, S.; SHI, S. Q.; CAI, L.; LI, J. Soy protein isolate-based films cross-linked by epoxidized soybean oil. **RSC Advances**, v. 5, n. 101, p. 82765-82771, 2015.

WATHARKAR, R. B.; CHAKRABORTY, S.; SRIVASTAV, P. P.; SRIVASTAVA, B. Foaming and foam mat drying characteristics of ripe banana [*Musa balbisiana* (BB)] pulp. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 8, p. e13726, 2021.

Capítulo 4

*ESTABILIDADE NO ARMAZENAMENTO
DE PÓ DE ACEROLA OBTIDO POR
SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA:
ANÁLISE DA RETENÇÃO DE
COMPOSTOS BIOATIVOS AO LONGO DO
TEMPO*

4- ESTABILIDADE NO ARMAZENAMENTO DE PÓ DE ACEROLA OBTIDO POR SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA: ANÁLISE DA RETENÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS AO LONGO DO TEMPO

RESUMO

A acerola, uma fruta rica em vitamina C e contendo outros compostos bioativos, enfrenta desafios em relação à estabilidade e à vida útil após a colheita. A secagem em leito de espuma como é uma técnica promissora para uso industrial em qualquer escala de produção. Nesse processo, o suco ou purê de alimentos é transformado em uma espuma estável com mediante adição de agentes espumantes, onde as proteínas vegetais têm ganhado algum destaque por promoverem a incorporação de ar e conferir estabilidade à espuma. Além disso, as proteínas de origem vegetal são consideradas mais sustentáveis que proteínas de origem animal, se adequando às demandas crescentes de consumidores que buscam opções vegetarianas e veganas. A modelagem cinética de reações de deterioração é uma ferramenta valiosa para prever alterações em alimentos desidratados, a qual permite estimar sua vida útil e determinar mudanças durante o seu armazenamento, o que é crucial para compreender os mecanismos de degradação e subsidiar o desenvolvimento adequado do processo e do produto, a seleção da embalagem e a determinação das condições de armazenamento e de comercialização. O objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade do pó de polpa de acerola armazenado ao longo de 60 dias, com ênfase na retenção de vitamina C e de compostos fenólicos totais (CFT), assim como na variação de cor, umidade e atividade de água, e estimar sua vida de prateleira por testes acelerados, utilizando as temperaturas de 5 °C (controle), 25 °C (ambiente) e 35 °C (acelerada). Os pós foram obtidos por meio da secagem em leito de espuma da polpa de acerola com isolado proteico de soja (SPI), monoglicérides destilados (D) e ésteres de mono e diglicérides de ácidos graxos com ácido láctico (L). A degradação de vitamina C foi mais acentuada que a de CFT, proporcionando vida de prateleira, em condições ambiente, ligeiramente menor que aquela em relação ao CFT, porém, o prazo estimado com base na meia vida da substância foi de aproximadamente seis meses, o que representa um período bom de armazenamento. A utilização de SPI com D e L reduziu ligeiramente a degradação da vitamina C enquanto aumentou a de CFT em relação aos pós somente com SPI. Alterações na cor do pó durante o armazenamento foram perceptíveis ao olho humano, tornando o pó ligeiramente mais escuro, e seu alaranjado, um pouco mais amarelo. Elevação do conteúdo de água durante o armazenamento causou aglomeração do pó, destacando a necessidade de embalagens com menor permeabilidade ao vapor de água, devido à sua elevada higroscopicidade.

Palavras-chave: cinética de degradação; compostos fenólicos totais, vitamina C

4.3 INTRODUÇÃO

A acerola possui um teor elevado de vitamina C, além de conter uma variedade de substâncias bioativas em quantidades significativas, como compostos fenólicos, flavonoides, antocianinas e carotenoides, porém, quando madura, tem uma vida útil curta de apenas 2 a 3 dias em temperatura ambiente após a colheita, cuja rápida perecibilidade dificulta sua comercialização no mercado de frutas frescas (PRAKASH; BASKARAN, 2018). Com isso, para a acerola ser industrializada, há diversos desafios, especialmente quanto à manutenção da estabilidade de seus compostos bioativos e à extensão de sua vida útil (SOUZA et al., 2020).

Dentre as diversas abordagens para a conservação de alimentos, uma técnica de interesse é a secagem em leito de espuma. Essa técnica envolve a transformação de suco ou purê de alimentos em uma espuma estável, utilizando um agente espumante, para, a seguir, a espuma ser desidratada e, por fim, moída (PRIYADARSHINI et al., 2023). As proteínas desempenham um papel fundamental como agentes espumantes na incorporação de ar na estrutura dos alimentos, por apresentarem propriedades de espumabilidade e alta estabilidade da espuma (FARID et al., 2023).

As proteínas provenientes de fontes vegetais têm sido reconhecidas como uma opção viável para substituir as proteínas de origem animal. Essa substituição possibilita que os consumidores mantenham uma ingestão consistente de calorias e proteínas, enquanto minimizam impactos negativos na saúde e no meio ambiente (BAZOCHE et al., 2023). Além disso, as proteínas vegetais são especialmente adequadas para atender às demandas de públicos que adotam dietas flexitarianas, vegetarianas e veganas (MA et al., 2023).

A investigação de alterações na composição de produtos em pó durante o armazenamento ao longo do tempo é de extrema importância para a compreensão aprofundada dos mecanismos envolvidos na degradação desses produtos. Testes acelerados de armazenamento são ferramentas úteis para a determinação da vida útil de produtos armazenados (BREDA; SANJINEZ-ARGANDOÑA; AC CORREIA, 2012; MOURA et al. 2007). Com isso, a modelagem cinética permite previsão e controle das alterações nos índices de qualidade dos alimentos. Uma abordagem empírica baseada na modelagem de reações de ordem zero, primeira e segunda ordem tem sido amplamente empregada para estimar a vida útil dos produtos alimentícios (ZHANG et al., 2021).

Tais informações têm o potencial de ampliar significativamente as possibilidades de produção e aplicação desses ingredientes em sistemas alimentares.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo consistiu em investigar a estabilidade da polpa de acerola em pó obtida através da secagem em leito de espuma. As cinéticas de degradação da vitamina C e dos compostos fenólicos totais (CFT), bem como de variação da cor e da atividade de água, ao longo do tempo de armazenamento, foram avaliadas a partir de três diferentes temperaturas de armazenamento, sendo elas 5 °C (temperatura controle), 25 °C (temperatura ambiente) e 35 °C (temperatura acelerada), pelo período de 60 dias para a avaliação da estabilidade dos parâmetros analisados.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Materiais

A polpa de acerola foi adquirida em um estabelecimento comercial na cidade de São José do Rio Preto, em São Paulo. O isolado de proteína de soja (SPI) utilizado no estudo, com teor de proteína de 91,14% em base seca, foi obtido da empresa Ecil Trading (Empreendimento Comercial e Industrial Ecil Ltda, São Paulo). Os agentes espumantes utilizados, monoglicerídeos destilados à base de óleos vegetais (Dimodan[®], DuPont[™]) e ésteres de mono e diglicerídeos de ácidos graxos com ácido láctico, derivados de óleos vegetais naturais (Grinsted[®] Lactem, DuPont[™]), foram doados pela empresa DuPont – Danisco Brasil Ltda.

Todos os reagentes utilizados no estudo foram de grau PA e da marca Synth (Diadema, Brasil), incluindo o 2,6-diclorofenolindofenol, ácido ascórbico, ácido gálico, ácido oxálico, acetona, álcool etílico, bicarbonato de sódio, carbonato de sódio, éter de petróleo, Folin-Ciocalteu e sulfato de sódio.

4.2.2 Métodos

4.2.2.1 Obtenção da polpa de acerola em pó

O pó utilizado para a análise da cinética de degradação foi obtido por meio do processo de secagem em leito de espuma, utilizando um secador de leito fixo equipado com um ventilador centrífugo (modelo CV3600, Ibram, São Paulo, SP, Brasil). Durante a secagem, o ar quente circulou a uma velocidade de 1,4 m/s e a temperatura foi mantida a 70 °C. Conforme discutido detalhadamente no capítulo 2, a utilização dessa temperatura de secagem resultou na

obtenção de um produto com teores mais elevados de vitamina C em comparação com a temperatura de 60 °C. Além disso, os tratamentos que incluíram a presença de SPI em sua formulação também apresentaram maior retenção desse composto. Portanto, os tratamentos submetidos a 70 °C e compostos por SPI foram selecionados para esta etapa de estudo de armazenamento.

Após o processo de secagem, os pós de acerola foram acondicionados em embalagens plásticas flexíveis metalizadas do tipo Stand-up Pouch, composta por duas camadas: uma camada interna de Polietileno e uma camada externa de Poliéster, denominada Tradpouch 80MZ Metalizado com zíper (Gualapack Brasil Indústria e Comércio S.A), cujas dimensões são 19,3 cm × 12,3 cm, com taxa de permeabilidade ao vapor de água inferior a 5 g/m²/dia e a taxa de permeabilidade ao oxigênio, inferior a 60 cm³/m²/dia. Em seguida, essa embalagem foi armazenada no freezer, em temperatura de -18 °C, protegida da luz, pelo período de, no máximo, 7 dias, durante o qual foi sendo produzida a quantidade necessária de polpa em pó para o estudo de armazenamento.

Em seguida, todos os pós de acerola foram homogeneizados e acondicionados em embalagem Tradpouch 80MZ Metalizado com zíper, com dimensões de 12,5 cm × 8 cm, sendo que cada embalagem continha aproximadamente 3 g. Para acompanhamento da vida de prateleira dos pós, estes foram armazenados em câmaras de incubação com controle de temperatura (BOD TE-391, Tecnal, Piracicaba, Brasil; BOD BT-71, Simétrica-Biotech, Piracicaba, Brasil). Todas as amostras foram armazenadas no mesmo dia, nas três diferentes câmaras incubadoras, às temperaturas de 5 °C (temperatura controle), 25 °C (temperatura ambiente) e 35 °C (temperatura acelerada) (MOURA et al., 2007), ao longo de um período de 0,10, 20, 40 e 60 dias, em triplicata.

Durante os períodos de armazenamento mencionados, foram conduzidas as seguintes análises nos pós de acerola: determinação da umidade e da atividade de água, mensuração de parâmetros de cor, quantificação do teor de vitamina C e de compostos fenólicos totais (CFT).

4.2.2.2 Umidade

O teor de água foi determinado em triplicata, por método gravimétrico, no qual as amostras foram secadas em estufa a vácuo, a 60 °C e 10 kPa, até atingirem peso constante (AOAC, 1995).

4.2.2.3 Atividade de água

A atividade de água das amostras foi determinada em triplicata, utilizando um analisador de atividade de água (Aqualab 4TEV, Decagon-Meter, EUA), utilizando o sensor de ponto de orvalho.

4.2.2.4 Análise de Cor

As análises de cor foram feitas para os pós de acerola, em quadruplicata utilizando espectrofotômetro de bancada (ColorFlex45/0, HunterLab, Estados Unidos), com iluminante D65 ângulo do observador de 10°. Para cada análise a leitura foi registrada em quatro posições, ou seja, nos ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°. Os valores absolutos de L^* , a^* e b^* foram determinados por meio do software Universal, versão 4.10. Através das coordenadas a^* e b^* , foi calculado o croma (C^*), que expressa o grau de intensidade ou saturação da cor (Equação 4.1), assim como a propriedade, conhecida como ângulo hue (h), que representa a tonalidade da cor (Equação 4.2). Com todos os parâmetros foi determinada a diferença total de cor (ΔE) (Equação 4.3) (PATHARE et al., 2013).

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (4.1)$$

$$h = \arctg \frac{b^*}{a^*} \quad (4.2)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L^{*'})^2 + (a^* - a^{*'})^2 + (b^* - b^{*'})^2} \quad (4.3)$$

em que: L^{*} , a^{*} , b^{*} se referem aos parâmetros de cor da amostra inicial (tempo zero).

4.2.2.5 Vitamina C

A determinação do conteúdo de ácido ascórbico no pó de acerola foi realizada, utilizando o método descrito na AOAC (1984) modificado por Benassi e Antunes (1988). Os resultados foram expressos em mg de vitamina C/ 100g de matéria seca.

4.2.2.6 Compostos Fenólicos Totais (CFT)

Utilizou-se 0,09 g de pó de acerola e 5 mL de álcool etílico (80%) na preparação dos extratos para obtenção de CFT. A mistura resultante foi homogeneizada em Turrax (T25 digital, IKA, Alemanha), submetida a banho ultrassônico (Q3.0/40A, Ultronique, Brasil) por 15 min, e centrifugada a 4 °C e 6000 rpm por 20 min em centrífuga (Z326K, Hermle, Alemanha). Foram realizadas duas extrações sucessivas, e os sobrenadantes foram transferidos para frascos de vidro âmbar (MARIANO-NASSER et al., 2017).

Os CFT foram quantificados pelo método de Folin-Ciocalteu, seguindo a metodologia descrita por Asami et al. (2003). A absorbância foi lida a 765 nm em um espectrofotômetro (GENESYS 10S UV-VIS, Thermo Scientific, EUA). A quantificação dos CFT foi feita utilizando curva de calibração preparada com solução padrão de ácido gálico. Os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico (EAG), em miligramas de ácido gálico por grama de matéria seca.

4.2.2.7 Retenção

A retenção de vitamina C e CFT durante o processo de preparação e de secagem das espumas foi calculada de acordo com a Equação (4.4) (AMADO; SILVA; MAURO, 2020):

$$\text{Ret}(\%) = \frac{C_f}{C_i} \times 100 \quad (4.4)$$

em que Ret é a retenção da substância (vitamina C ou CFT) durante o processo, C_f é o seu conteúdo final nas amostras, após o processo e C_i , o seu conteúdo inicial, antes do processo, ambos expressos em relação ao conteúdo de matéria seca das amostras.

4.2.3 Determinação das constantes da taxa de reação

Os dados obtidos da umidade, atividade de água, parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , C^* , h e ΔE), vitamina C e CFT foram analisados quanto à ordem de reação de degradação e calculadas as respectivas velocidades de reação (k) nas diferentes temperaturas (MOURA et al., 2007). Os parâmetros de cor, atividade de água e umidade foram representados pelo modelo de cinética de reação de ordem zero (Equação 4.5), enquanto a vitamina C e CFT foram descritos pelo modelo de cinética de segunda ordem (Equação 4.6).

$$A = \pm kt + A_0 \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{A} = \pm kt + \frac{1}{A_0} \quad (4.6)$$

em que A é o parâmetro avaliado em função do tempo t (dia) e A₀ é o valor inicial do parâmetro; k é a constante de velocidade de reação, em que sua unidade depende da ordem da reação (dia⁻¹ na Eq.4.5e (mg/100g ·dia)⁻¹ na Eq. 4.6).

A energia de ativação (Ea) da reação de degradação foi determinada usando o modelo de Arrhenius (equação 4.7). A equação (4.8) apresenta a linearização da equação (4.7) para a obtenção da Ea a partir do coeficiente angular, que é determinado pela regressão linear de ln k versus (1/T) (K⁻¹).

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.7)$$

$$\ln k = \left(-\frac{E_a}{RT}\right) + \ln k_0 \quad (4.8)$$

Sendo:

R = constante dos gases ideais (8,314 J · K⁻¹ · mol⁻¹).

T = temperatura (K⁻¹)

k = constante de velocidade da reação (dia⁻¹ ou (mg/100g ·dia)⁻¹)

k₀ = constante de velocidade da reação no instante inicial (dia⁻¹ ou (mg/100g ·dia)⁻¹)

A determinação da vida útil estimada do produto em diferentes temperaturas foi baseada em um valor limite estabelecido, utilizando a concentração de 50% do valor inicial da vitamina C e CFT avaliando (meia-vida) como critério de qualidade, ou seja, A₀/A_{VP} = 2. Isso significa que quando a concentração do parâmetro avaliado atinge metade do seu valor inicial, é considerado o limite de qualidade. Para a umidade, a vida útil foi limitada ao conteúdo de umidade da monocamada, determinado a 25 °C (Capítulo 3). Essa estimativa foi feita a partir das Equações para reações de ordem zero (4.9) e de segunda ordem (4.10):

$$t_{VP} = \frac{A_{VP} - A_0}{k} \quad (4.9)$$

$$t_{VP} = \frac{\frac{1}{A_{VP}} - \frac{1}{A_0}}{k} \quad (4.10)$$

sendo que k é a constante de velocidade de reação, o subíndice 0 significa concentração inicial e o subíndice VP, vida de prateleira.

4.2.4 Análise Estatística

Os dados foram expressos em média \pm desvio padrão. As constantes de reação foram determinadas por regressão linear, e a eficiência dos ajustes foi avaliada através do coeficiente de determinação (R^2).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Vitamina C

A cinética de degradação da vitamina C presente no pó de acerola submetido a diferentes tratamentos ao longo do tempo foi investigada e demonstrada na Figura 4.1. Os resultados foram bem descritos por uma reação de segunda ordem. Essa figura consiste em duas partes distintas: a Figura 4.1a, fornece informações sobre a variação da concentração de vitamina C ao longo do tempo, enquanto a Figura 4.1b, apresentada em termos de retenção desse nutriente, permite melhor visualização da cinética, pois o ponto inicial é o mesmo para todas as equações. Os valores das médias e dos desvios-padrão estão listados na Tabela A.1 (Apêndice A).

determinada no armazenamento acelerado (35 °C), aproximadamente uma ordem de magnitude. A Figura 4.1b representa a retenção dessa vitamina durante o armazenamento, facilitando a visualização do comportamento em cada condição, uma vez que os valores são mais comparáveis entre si, por serem normalizados em relação ao conteúdo inicial da vitamina. Ela mostra mais claramente o efeito da temperatura sobre a vitamina, maior que o efeito da composição das misturas, demonstrando que temperaturas mais elevadas aceleram consideravelmente a reação de degradação da vitamina C.

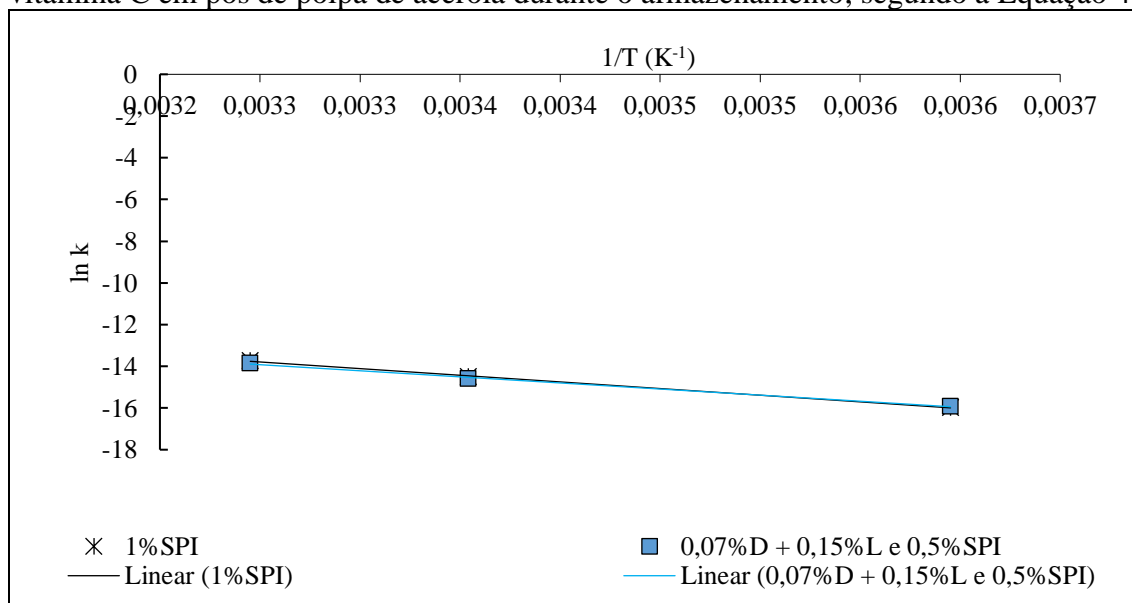
A retenção da vitamina C é um indicador da manutenção da qualidade nutricional, devido a sua grande instabilidade química. Por essa razão, é usual considerar que, se ela for preservada durante o processamento e armazenamento dos alimentos, os demais nutrientes também serão preservados (BREDA; SANJINEZ-ARGANDOÑA; CORREIA, 2012; SANTOS; SILVA, 2008).

O tratamento 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI apresentou taxa de degradação ligeiramente mais baixa em comparação com o tratamento 1% SPI, nas condições ambientais e aceleradas, indicando um possível efeito protetor dos aditivos adicionados.

Diversos elementos podem impactar a degradação da vitamina C, como a temperatura, a atividade de água, o pH, a presença de oxigênio e a presença de íons metálicos, no entanto, quando se trata do armazenamento de alimentos, os principais fatores que podem afetar as reações de degradação são a temperatura e a atividade de água (UDDIN; HAWLADER; ZHOU, 2006).

A influência da temperatura de armazenamento sobre a constante da taxa de degradação da vitamina C, pode ser avaliada através da determinação da energia de ativação, de acordo com a equação de Arrhenius (Equação 4.7). A Figura 4.2 ilustra o efeito da temperatura sobre a constante da reação de degradação da vitamina C nos pós de acerola, a partir da qual determinou-se a energia de ativação.

Figura 4.2 – Efeito da temperatura de armazenamento sobre a contante da degradação da vitamina C em pós de polpa de acerola durante o armazenamento, segundo a Equação 4.8



L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.

Fonte: Elaborado pelo autor

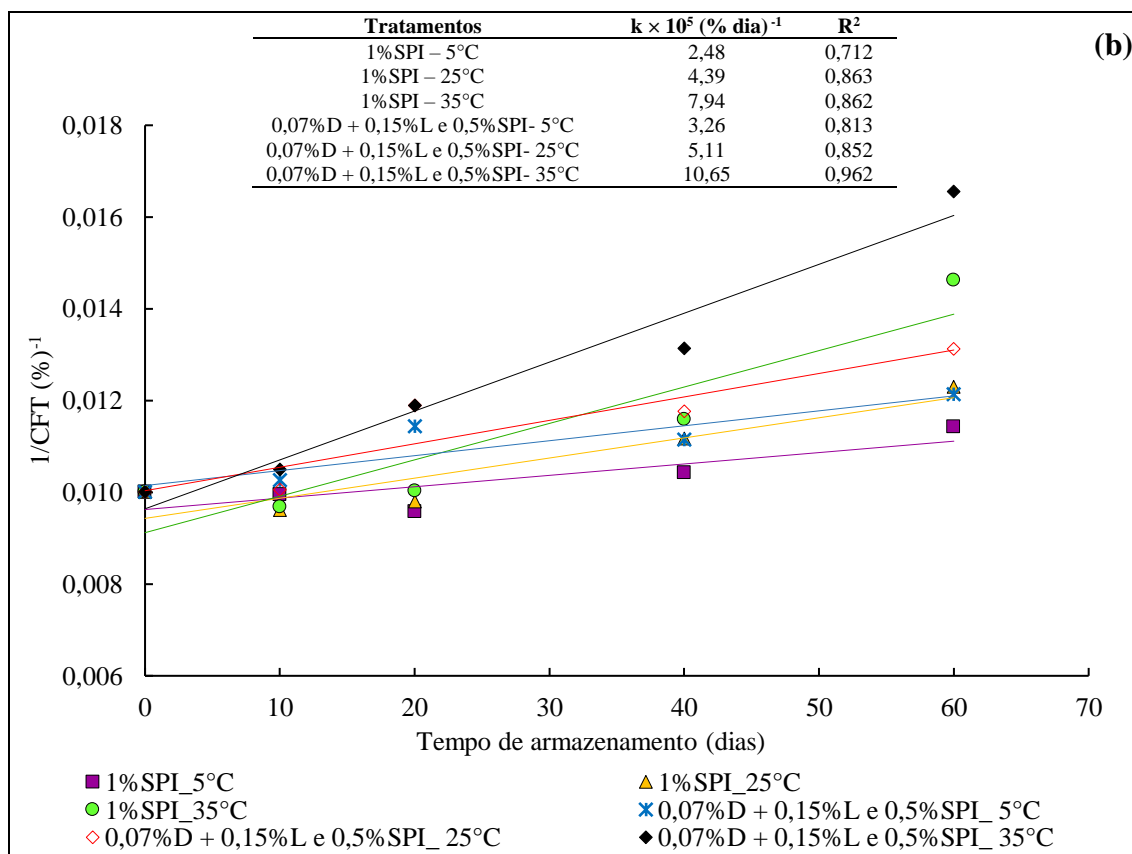
A energia de ativação revela a sensibilidade da reação em relação à temperatura, sendo que valores mais elevados indicam uma dependência significativa da temperatura, resultando em uma reação mais lenta em baixas temperaturas, porém mais rápida em temperaturas elevadas (MERCALI et al., 2015). Ao examinar a Figura 4.2, é possível constatar que a energia de ativação para a degradação de vitamina C nas amostras contendo apenas SPI foi $E_a = 53,01$ kJ/mol com R^2 de 0,998. Esses valores indicam uma importante aceleração da taxa de reação de degradação com a variação da temperatura, como pôde ser observado através das constantes de velocidade na Figura 4.1. As amostras contendo D e L e SPI, por sua vez, apresentaram energia de ativação $E_a = 48,55$ kJ/mol com R^2 de 0,997.

A determinação da vida de prateleira da polpa de acerola em pó levando em consideração a concentração mínima de vitamina C de 50% da concentração inicial (meia-vida), foi estimada para a polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso dos diferentes agentes espumantes (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na meia vida da vitamina C

Dias de estimativa da vida de prateleira			
Tratamentos	5°C	25°C	35°C
1% SPI	750	172	79
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI	677	180	86

L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.



L=Lactem; D=Dimodan®, SPI= Isolado da proteína de soja.

Fonte: Elaborado pelo autor

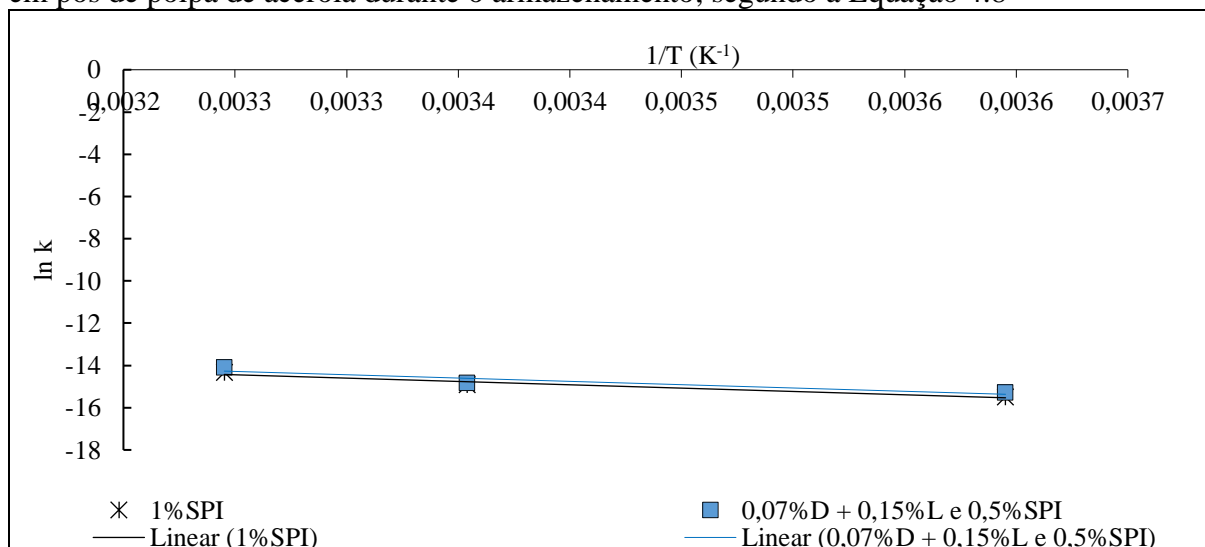
A degradação dos CFT está representada na Figura 4.3a. A constante de velocidade da reação (k) determinada nas condições normais (25 °C) aumentou pouco, menos que duas vezes em relação ao controle (5 °C) enquanto o armazenamento acelerado (35 °C) aumentou aproximadamente três vezes, o que demonstra que a degradação desses compostos é inferior à da vitamina C. Entretanto, os ajustes não foram muito eficientes. Com isso, Figura 4.1b, que representa a retenção de CFT durante o armazenamento, mesmo normalizando as curvas em relação ao conteúdo inicial de CFT, pouco acrescenta em termos de comparação visual.

Ao comparar a utilização dos agentes espumantes ao longo do tempo de armazenamento, observa-se que a degradação dos CFT nos pós de acerola é influenciada pelos agentes espumantes aplicados. Nesse sentido, constata-se que o tratamento contendo 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI apresentou uma taxa de degradação ligeiramente maior do que o tratamento com 1%SPI em condições aceleradas.

Conforme Lago e Noreña (2017), os CFT são suscetíveis a influências externas que podem afetar sua estabilidade. Fatores como exposição à luz, umidade, complexação com metais e presença de oxigênio dissolvido têm demonstrado ter impacto significativo sobre esses compostos.

A Figura 4.4 ilustra o efeito da temperatura sobre a constante da reação de degradação dos CFT nos pós de acerola, determinado a partir da equação de Arrhenius (Equação 4.7).

Figura 4.4 – Efeito da temperatura de armazenamento sobre a contante da degradação dos CFT em pós de polpa de acerola durante o armazenamento, segundo a Equação 4.8



L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 4.4, determinou-se a energia de ativação para a degradação de CFT. O valor para as amostras D e L e SPI foi $E_a=26,07$ kJ/mol com $R^2=0,881$, muito semelhante ao encontrado para os pós contendo apenas SPI, que foi $E_a = 26,24$ kJ/mol com $R^2=0,950$. A influência da temperatura sobre a degradação desses compostos é inferior àquela observada em relação à degradação da vitamina C, pois os valores de E_a resultaram pouco maiores que a metade dos valores determinados para a vitamina C.

Através da determinação da vida de prateleira da polpa de acerola em pó, foi possível comprovar a influência dos agentes espumantes aplicados e da temperatura de armazenamento, levando em consideração que a concentração mínima de CFT corresponderia a 50% da concentração inicial (meia-vida). Os resultados, expressos em dias, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na meia vida dos CFT

Dias de estimativa da vida de prateleira			
Tratamentos	5°C	25°C	35°C
1%SPI	402	228	126
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI	307	196	94

L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.

Os resultados revelaram que, em todas as temperaturas testadas, o tratamento com 1%SPI apresentou tempos de vida de prateleira mais longos em comparação com o tratamento com 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI. Isso sugere que o 1%SPI proporciona uma maior estabilidade e durabilidade à polpa de acerola em pó durante o armazenamento, quando a degradação de CFT é considerada, resultado inverso ao encontrado para a vitamina C.

Exceto para o controle (5 °C), A taxa de degradação de CFT foi ligeiramente maior que de vitamina C na temperatura controle (5 °C), o que reduziu a vida de prateleira, nessas condições, em relação ao CFT. Por outro lado, nas outras temperaturas, a vida de prateleira dos CFT foi superior à da vitamina C, ainda que, no caso do tratamento com 0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI, as diferenças tenham sido pequenas.

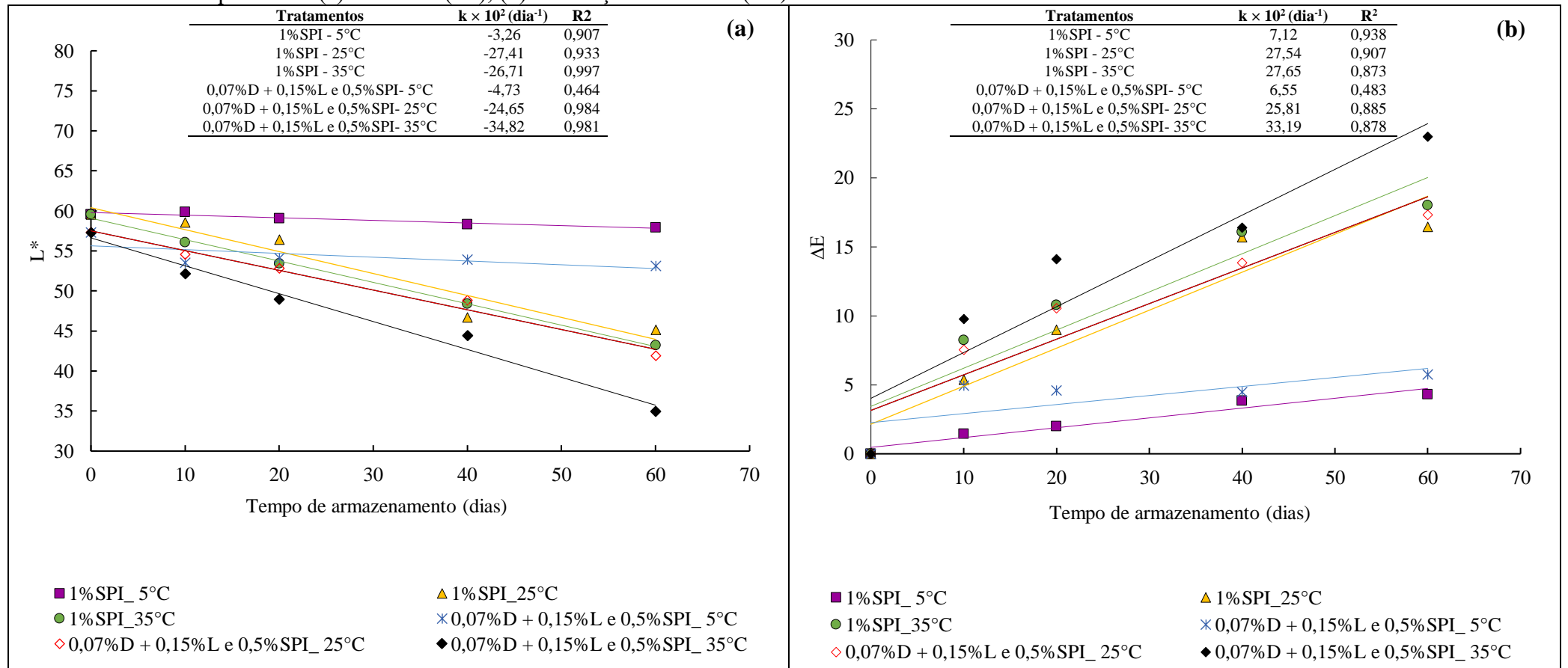
4.3.3 Cor

Através da análise de cor é possível detectar e avaliar as alterações nas características de qualidade do pó ao longo do tempo de armazenamento, sendo possível identificar padrões e tendências que indicam a degradação gradual do produto.

Na Tabela B.3 (Apêndice A) estão apresentadas as médias e desvios dos parâmetros de cor (L^* , a^* , b^* , C^* , h e ΔE) determinados ao longo do armazenamento, para os diferentes tratamentos e temperaturas de armazenamento dos pós de acerola.

Foi possível ajustar um modelo cinético aos parâmetros L^* e ΔE , enquanto os parâmetros a^* , b^* e C^* e h não foram bem representados por modelos de reações. Os valores das constantes (k) e os coeficientes (R^2) foram obtidos a partir dos dados de L^* e ΔE em função do tempo de armazenamento, e são apresentados na Figura 4.5, juntamente com os valores observados e adequadamente preditos por uma reação de ordem zero.

Figura 4.5 – Modelo de cinética de reação de ordem zero para a variação dos parâmetros a cor dos pós de acerola durante o armazenamento em diferentes temperaturas: (a) claridade (L^*); (b) diferença total de cor (ΔE)



L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.5a apresenta a cinética do parâmetro de claridade das amostras, demonstrando que houve diminuição de seus valores ao longo do tempo para todas as formulações, o que indica uma tendência de escurecimento das amostras. Além disso, pode-se notar que as amostras contendo D + L e SPI, na condição de armazenamento acelerado (35°C), apresentaram uma taxa de escurecimento mais acentuada em comparação com a formulação apenas com SPI. As mudanças de L^* podem ser observadas nos pós de acerola submetidos às diferentes temperaturas de armazenamento, evidenciando o efeito da temperatura e dos agentes espumantes utilizados. Essas alterações poderiam ser atribuídas à ocorrência de reações químicas, tais como a decomposição da vitamina C, que em condições aeróbicas, devido ao ar remanescente dentro da embalagem ou mesmo à difusão de oxigênio através da embalagem, resultaria na formação de hidroximetilfurfural (HMF), que atua como precursor de pigmentos marrons (YANG et al. em 2022). Há diversos mecanismos de degradação da vitamina C, mas a degradação anaeróbica, em geral, é menos significativa que a aeróbica (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2008). Portanto, é importante considerar a presença de ar residual remanescente dentro da embalagem, especialmente em produtos sensíveis à oxidação, podendo causar a deterioração dos componentes e levar a alterações de cor durante o armazenamento (PUA et al., 2008).

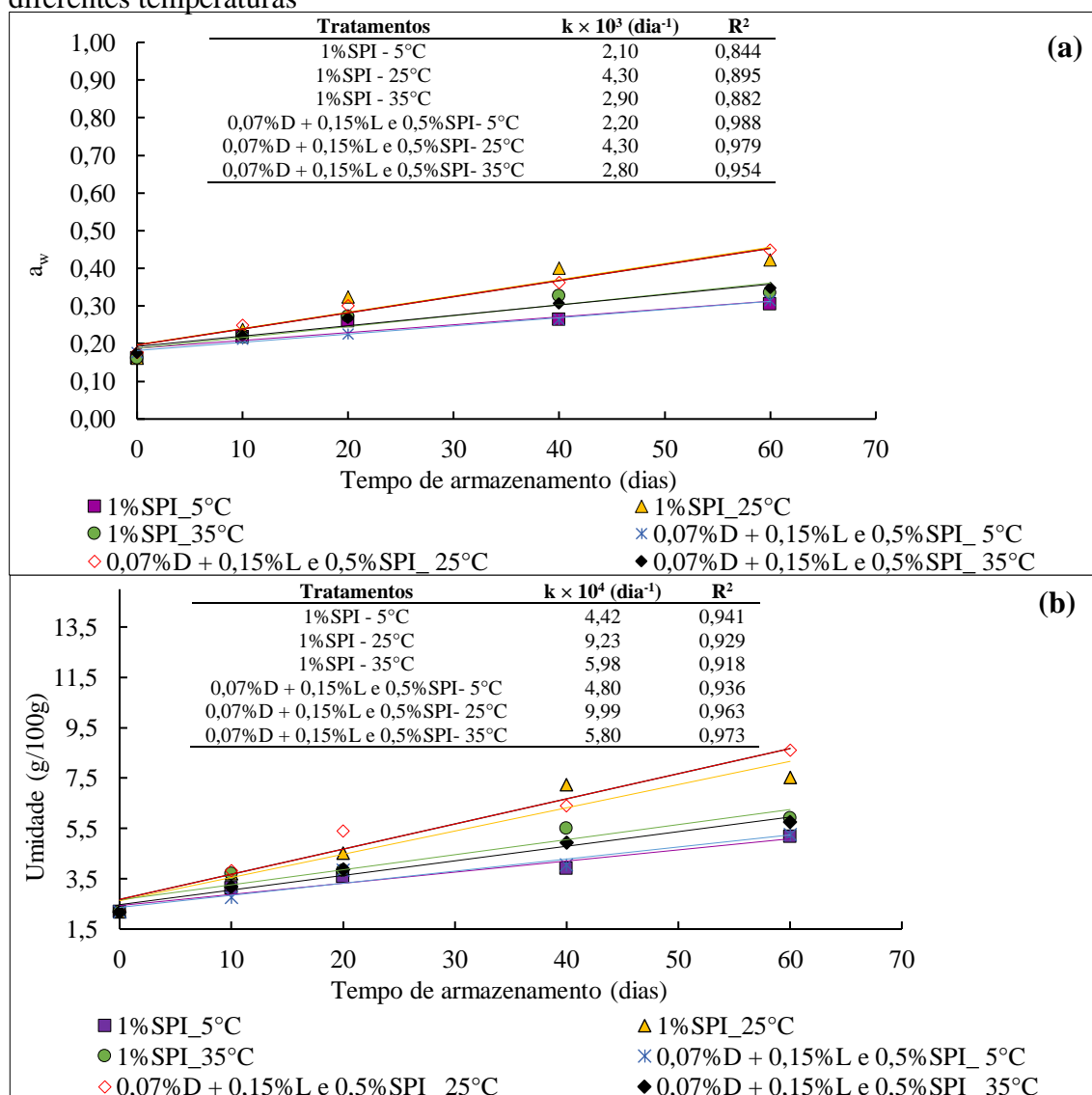
A diferença de cor dos pós de acerola (ΔE) ao longo do tempo foi determinada considerando os valores no instante inicial ($t=0$), como referência. A Figura 4.5b apresenta a variação da diferença total de cor em função do tempo para os diferentes tratamentos. Quando o valor de ΔE é superior a 5, de acordo com Castellar, Obón e Fernández-López (2006), pode-se considerar que o olho humano é capaz de distinguir a diferença entre as cores. Com base nessa informação, dos tratamentos avaliados, aqueles submetidos à temperatura de 5 °C (controle) foram os únicos nos quais não foram observadas diferenças perceptíveis ao olho humano ao fim do período de armazenamento de 60 dias, quando comparado com o dia zero. No entanto, nas condições normais de armazenamento (25 °C) e em condição acelerada (35 °C), de acordo com o critério anteriormente mencionado, houve uma diferença visualmente perceptível após apenas 10 dias de armazenamento.

Esses resultados indicam que a temperatura de armazenamento influenciou significativamente a manutenção da cor dos pós de acerola, sendo que as amostras armazenadas à temperatura de 5 °C (controle) mantiveram sua cor original ao longo do período avaliado, enquanto a 25 °C (condição ambiente) e a 35 °C (condição acelerada) elas apresentaram alterações perceptíveis ao olho humano.

4.3.4 Atividade de água e Umidade

Umidade e atividade de água são fatores essenciais para compreender e controlar a estabilidade e preservar a qualidade de alimentos desidratados, durante seu armazenamento, especialmente de alimentos na forma de pó. A Figura 4.6 mostra o comportamento dos pós de acerola em relação ao ganho de água ao longo do armazenamento, sendo a Figura 4.6a referente à atividade de água (a_w) e a 4.6b, à umidade (g água/100 g pó de acerola), sendo que sua variação foi bem representada pela cinética de uma reação de ordem zero.

Figura 4.6 – Modelo de cinética de ordem zero para a variação de (a) atividade de água e (b) umidade dos pós de acerola (g água/100 g pó de acerola) durante o armazenamento em diferentes temperaturas



L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja.

Fonte: Elaborado pelo autor

As amostras armazenadas em todas as temperaturas apresentaram elevação da umidade e correspondente atividade de água ao longo do tempo, inclusive na temperatura controle (5 °C). Comparando-se as três temperaturas, na Figura 4.6, constata-se um fato curioso. A elevação do conteúdo de água e da correspondente atividade de água foi mais intensa nas amostras a 25 °C do que na condição acelerada de armazenamento (35 °C).

O fluxo difusivo da água através de um filme pode ser descrito com base na sua difusividade efetiva e no seu gradiente de concentração ao longo desse filme (LAROTONDA, et al., 2005, CUSSLER, 1997). A permeabilidade de um filme à água é uma função da difusividade efetiva da água através dela. A taxa de transferência de massa, por sua vez, é dependente da permeabilidade do filme e da força motriz, sendo que esta última pode ser representada por um gradiente de pressão de vapor entre a superfície interna e a externa da embalagem (CRANK, 1975).

A pressão de vapor é frequentemente representada pelo produto da umidade relativa (UR) pela pressão de saturação do vapor de água naquela temperatura. Dada a baixa atividade de água das amostras, supõe-se que a variação da UR com a temperatura, no interior das embalagens, tenha sido bem menor que a variação no ambiente das câmaras, uma vez que elas não dispunham de controle de umidade. Portanto, é possível que a influência da temperatura de 35 °C sobre a diferença de pressão de vapor tenha sido mais significativa do que sobre a permeabilidade da água através do filme, quando comparada à temperatura de 25 °C, o que explicaria o comportamento das constantes na Figura 4.6.

Por outro lado, quando as amostras armazenadas na condição controle (5 °C) são comparadas com as amostras nas temperaturas mais altas, sua constante de velocidade é a menor (Figura 4.6), sugerindo que a transferência de água através do filme tenha sido bastante afetada pela diminuição de sua difusividade nessa temperatura.

Esses resultados, no geral, também são um indicativo de que a permeabilidade da embalagem ao vapor água, de 5 g/m²/dia (de acordo com o fabricante), é muito alta para pós de natureza altamente higroscópica, e que seria necessário embalar os pós em embalagens com menor permeabilidade.

Através da determinação da vida de prateleira da polpa de acerola em pó, foi possível comprovar a influência dos agentes espumantes aplicados, levando em consideração que a vida útil foi limitada ao conteúdo de umidade da monocamada, determinado a 25 °C. Os resultados, expressos em dias, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Estimativa do tempo de vida de prateleira da polpa de acerola em pó armazenada em diferentes temperaturas e com o uso de diferentes agentes espumantes, baseada na umidade

Dias de estimativa da vida de prateleira	
Tratamentos	25°C
1% SPI	46
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI	57

L=Lactem; D=Dimodan®; SPI= Isolado da proteína de soja

A diferença nas estimativas de vida de prateleira entre os tratamentos sugere que os diferentes agentes espumantes utilizados podem estar exercendo influência sobre a estabilidade da polpa de acerola em pó em condições de armazenamento específicas. O tratamento com D e L e SPI resultou em uma estimativa de vida de prateleira mais longa (57 dias), contribuindo para uma melhor conservação da polpa de acerola em pó, em comparação com o tratamento contendo apenas 1% SPI (46 dias).

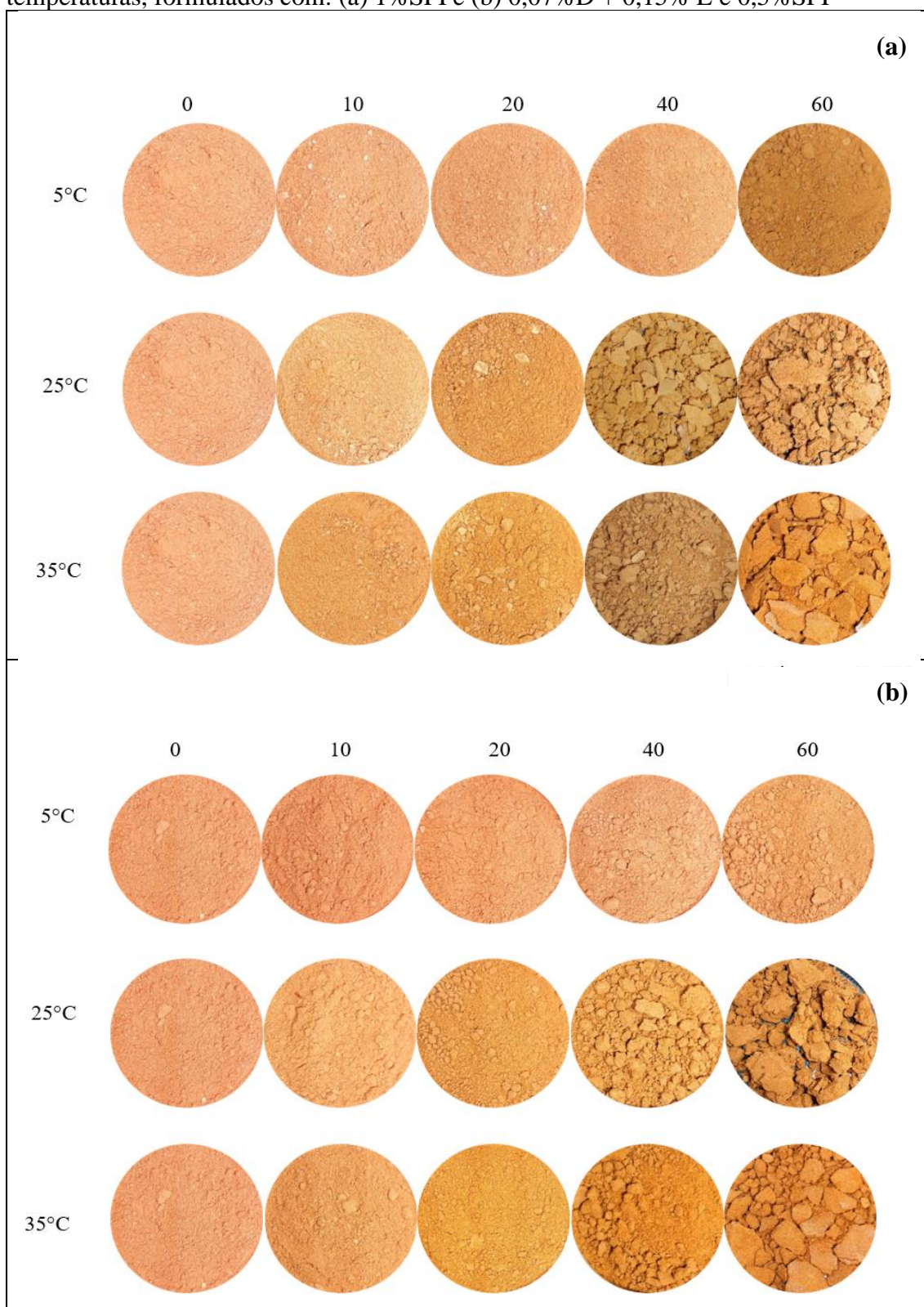
As constantes de velocidade (k) tanto da variação de umidade quanto de a_w evidenciaram que os tratamentos submetidos às condições ambientais (25 °C) exibiram valores mais elevados em comparação com as outras temperaturas. A umidificação mais intensa nessa condição causou um impacto visual significativo, como será discutido a seguir.

4.3.5 Análise visual dos pós ao longo do armazenamento

Na Figura 4.7, é possível examinar com maiores detalhes o comportamento dos pós da polpa de acerola obtidos a partir de diferentes agentes espumantes, ao longo do tempo, nas temperaturas de armazenamento. A Figura 4.7a corresponde à formulação com 1% SPI e a Figura 4.7b, à formulação 0,07%D + 0,15% L e 0,5%SPI. Nessa análise mais visual, observa-se que alguns dos tratamentos apresentaram a formação de aglomerações, conhecidas como “caking”, ao longo do processo de armazenamento, o que está relacionado ao ganho de umidade.

Essas imagens fornecem informações importantes sobre a estabilidade e a qualidade dos pós da polpa de acerola e, juntamente com dados de umidade e de sorção de água, inclusive da monocamada, e contribuem para estimativas e avaliações da vida de prateleira dos pós.

Figura 4.7 – Aparência dos pós de acerola durante o armazenamento nas diferentes temperaturas, formulados com: (a) 1%SPI e (b) 0,07%D + 0,15% L e 0,5%SPI



Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 4.7 é possível perceber que, em ambas as formulações estudadas, nas condições ambientais e aceleradas, entre o vigésimo e o quadragésimo dia de armazenamento,

os pós apresentaram formação de aglomerados ("caking"). Esse processo pode ocorrer nas polpas em pó e é caracterizado pela aglomeração e formação de um material pastoso quando o pó, com baixa umidade, alta coesão e fluidez, perde sua funcionalidade e qualidade (CARDOSO; LOBO; TEODORO, 2022). As imagens corroboram os dados de umidade e atividade de água apresentados, pois o processo de umidificação mostrou-se mais acentuado à temperatura de 25 °C.

A aglomeração dos pós, durante o armazenamento, destaca a importância da permeabilidade da embalagem e das condições ambientais, como temperatura e umidade às quais o material é exposto, cujo impacto é significativo na transformação do pó. A quantidade de material endurecido pode variar desde grandes pedaços, que se quebram facilmente quando pressionados, até a fusão irreversível de partículas que não preservam mais as características do material original (ZAFAR et al., 2017; RYABOVA; SEMIPYATNY; GALSTYAN, 2023). Esses aglomerados podem afetar a homogeneidade e a estabilidade dos materiais, o que é um aspecto relevante a ser considerado no desenvolvimento de produtos, seleção de embalagens e controle das condições de armazenamento.

4.4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi possível observar que a estocagem de pós de acerola requer cuidados específicos para preservar a qualidade nutricional e visual do produto. A temperatura de armazenamento desempenhou um papel importante na degradação da vitamina C e dos CFT, sendo que influenciou mais a degradação da vitamina C do que dos CFT. Os agentes espumantes revelaram pouca influência sobre a degradação dos pós em condições ambiente, sendo que a formulação D e L e SPI apresentou taxas mais baixas de degradação da vitamina C do que a formulação com SPI, enquanto a formulação com SPI apresentou melhor desempenho com os CFT. A vida de prateleira em condições ambientais, baseada na meia vida da vitamina C, foi de 172 dias para a formulação com SPI e 180 dias para a formulação com L e D e SPI, enquanto a baseada nos CFT foi de 228 dias para a formulação com SPI e 196 para a formulação com L e D e SPI.

As amostras armazenadas em condições ambientais e aceleradas tornaram-se ligeiramente mais escuras e o alaranjado original tornou-se um pouco mais amarelo. A alteração total de cor nesses pós foi considerada perceptível ao olho humano.

Umidade e atividade de água apresentaram mudanças significativas durante o armazenamento. Essas variações foram acentuadas no armazenamento a 25 °C, cujas umidades,

atingiram o valor da umidade da monocamada em aproximadamente um mês e meio, para o pó somente com SPI, e aproximadamente dois meses para o pó contendo SPI, L e D. Entre o vigésimo e o quadragésimo dia foi possível observar formação de aglomerados. O ganho de umidade foi atribuído à elevada permeabilidade da embalagem ao vapor de água.

Portanto, os resultados levam a concluir que é essencial adotar medidas adequadas, como controle de temperatura de armazenamento, escolha de embalagens apropriadas e até mesmo ajuste de formulações para minimizar a degradação dos compostos bioativos nos pós de acerola e preservar sua qualidade física e nutricional durante o armazenamento.

4.5 REFERÊNCIAS

AMADO, L. R.; SILVA, K. D. S.; MAURO, M. A. Drying of mangoes (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) at changeable temperature conditions—Effects on energy consumption and quality of the dehydrated fruit. **Journal of Food Process Engineering**, v. 44, n. 2, p. e13615, 2020.

ASAMI, D. K.; HONG, Y. J.; BARRETT, D. M.; MITCHELL, A. E. Comparison of the total phenolic and ascorbic acid content of freeze-dried and air-dried marionberry, strawberry, and corn grown using conventional, organic, and sustainable agricultural practices. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 5, p. 1237-1241, 2003.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL (AOAC). **Official Methods of Analysis**. 16th ed., Washington, DC.: Chemists, 1995.

BAZOCHE, P.; GUINET, N.; PORET, S.; TEYSSIER, S. Does the provision of information increase the substitution of animal proteins with plant-based proteins? An experimental investigation into consumer choices. **Food Policy**, v. 116, p. 102426, 2023.

BENASSI, M. D. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of metaphosphoric and oxalic acids as extractants solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables, **Arquivos de Biologia e Tecnologia** v. 31, n. 4, p. 507-513, 1988.

BREDA, C. A.; SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; DE AC CORREIA, C. Shelf life of powdered *Campomanesia adamantium* pulp in controlled environments. **Food Chemistry**, v. 135, n. 4, p. 2960-2964, 2012.

CARDOSO, C. E. D. F.; LOBO, F. A. T. F.; TEODORO, A. J. Influence of foam mat drying on the nutritional and technological potential of fruits—a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, p. 1-15, 2022.

CASTELLAR, M. R.; OBÓN, J. M.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. A. The isolation and properties of a concentrated red-purple betacyanin food colourant from *Opuntia stricta* fruits. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 1, p. 122-128, 2006.

CRANK, J. **The mathematics of Diffusion**. 2nd. ed., Oxford: Claredon Press, 1975.

CUSSLER, E. L. **Diffusion. Mass Transfer in Fluid Systems**. 2nd. ed. New York: Cambridge University Press.1997.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L.; FENNEMA, O.R. **Fennema's Food Chemistry**. 4th. ed., Boca Raton: CRC Press, 2008, 1144 p.

FARID, E.; MOUNIR, S.; SILIHA, H.; EL-NEMR, S.; TALAAT, E. Effect of soy protein isolate concentration and whipping time on physicochemical and functional properties of strawberry powder. **Journal of Food Measurement and Characterization**, p. 1-12, 2023.

LAGO, C. C.; NOREÑA, C. P. Z. Thermodynamic and kinetics study of phenolics degradation and color of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) microparticles under accelerated storage conditions. **Journal of food science and technology**, v. 54, p. 4197-4204, 2017.

LAROTONDA, F. D. S.; MATSUI, K. N.; SOBRAL, P. J. A.; LAURINDO, J. B. Hygroscopicity and water vapor permeability of Kraft paper impregnated with starch acetate. **Journal of Food Engineering**, v. 71, p. 394–402, 2005.

MA, K. K.; GREIS, M.; LU, J.; NOLDEN, A. A.; MCCLEMENTS, D. J.; KINCHLA, A. J. Functional performance of plant proteins. **Foods**, v. 11, n. 4, p. 594, 2022.

MARIANO-NASSER, F. D. C.; NASSER, M. D.; FURLANETO, K. A.; RAMOS, J. A.; VIEITES, R. L.; PAGLIARINI, M. K. Bioactive compounds in different acerola fruit cultivares. **Semina: Ciências Agrárias (Londrina)**, v. 38, n. 4 Suppl. 1, p. 2505-2514, 2017.

MERCALI, G. D.; GURAK, P. D.; SCHMITZ, F.; MARCZAK, L. D. F. Evaluation of non-thermal effects of electricity on anthocyanin degradation during ohmic heating of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice. **Food chemistry**, v. 171, p. 200-205, 2015.

MOURA, S. C. S. R. D.; BERBARI, S. A.; GERMER, S. P. M.; ALMEIDA, M. E. M. D.; FEFIM, D. D. A. Determinação da vida-de-prateleira de maçã-passa por testes acelerados. **Food Science and Technology**, v. 27, p. 141-148, 2007.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. J. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36-60, 2013.

PRAKASH, A.; BASKARAN, R. Acerola, an untapped functional superfruit: a review on latest frontiers. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, p. 3373-3384, 2018.

PRIYADARSHINI, S.; RAYAGURU, K.; ROUTRAY, W.; DASH, S. K. Study of functional, biochemical, and sensory qualities of jackfruit pulp powder produced through optimized foam-mat drying parameters. **Journal of Food Science**, v. 88, n. 3, p. 926-941, 2023.

PUA, C. K.; HAMID, N. S. A.; TAN, C. P.; MIRHOSSEINI, H.; RAHMAN, R. A.; RUSUL, G. Storage stability of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder packaged in aluminium laminated polyethylene and metallized co-extruded biaxially oriented polypropylene during storage. **Journal of Food Engineering**, v. 89, n. 4, p. 419-428, 2008.

RYABOVA, A. E.; SEMIPYATNY, V. K.; GALSTYAN, A. G. Effects of storage conditions on milk powder properties. **Journal of Dairy Science**, 2023.

SANTOS, P. H. S.; SILVA, M. A. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables—A review. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1421-1437, 2008.

SOUZA, N. C.; DE OLIVEIRA NASCIMENTO, E. N.; DE OLIVEIRA, I. B.; OLIVEIRA, H. M. L.; SANTOS, E. G. P.; MATA, M. E. R. M. C.; GELAIN, D.P.; MOREIRA, J.C.F.; DALMOLIN, R.J.S.; DE BITTENCOURT PASQUALI, M. A. Anti-inflammatory and antioxidant properties of blend formulated with compounds of *Malpighia emarginata* DC (acerola) and *Camellia sinensis* L. (green tea) in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 128, p. 110277, 2020.

UDDIN, M. S.; HAWLADER, M. N. A.; ZHOU, L. Kinetics of ascorbic acid degradation in dried kiwifruits during storage. **Drying Technology**, v. 19, n. 2, p. 437-446, 2001.

YANG, H.; XU, L.; HOU, L.; XU, T. C.; YE, S. H. Stability of vitamin A, E, C and thiamine during storage of different powdered enteral formulas. **Heliyon**, v. 8, n. 11, p. e11460, 2022.

ZAFAR, U.; VIVACQUA, V.; CALVERT, G.; GHADIRI, M.; CLEAVER, J. S. A review of bulk powder caking. **Powder Technology**, v. 313, p. 389-401, 2017.

ZHANG, M.; CHEN, H.; MUJUMDAR, A. S.; TANG, J.; MIAO, S.; WANG, Y. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1239-1255, 2017.

CONCLUSÕES GERAIS

O presente estudo evidenciou que a secagem em leito de espuma da polpa de acerola é um processo promissor e eficiente para produzir produtos com elevado conteúdo nutricional. Para todas as formulações, a temperatura de 70 °C proporcionou retenções superiores de vitamina C comparativamente à temperatura de 60 °C, o que foi atribuído ao menor tempo de exposição da vitamina ao oxigênio, ao calor e a altos níveis de umidade. Os CFT e os carotenoides, no entanto, em algumas formulações específicas, foram preservados de forma mais eficiente na temperatura de 60 °C. Apesar de todos os agentes espumantes terem sido viáveis para a obtenção dos pós, as formulações com apenas SPI e mistura de L e D com SPI, secadas a 70 °C, demonstraram ser as condições mais promissoras e eficientes para produzir a polpa de acerola em pó, cujos pós apresentaram características físicas desejáveis e alta retenção de nutrientes, principalmente de vitamina C.

Durante o armazenamento dos pós, foram analisados tratamentos que continham SPI em sua composição, e verificou-se que os aditivos exerceram pouca influência na degradação dos pós sob condições ambientais. No entanto, a formulação D e L com SPI apresentou taxas mais baixas de degradação da vitamina C em comparação com a formulação apenas com SPI, enquanto esta última apresentou melhor desempenho na proteção dos CFT.

Ademais, a temperatura de armazenamento tem um papel significativo na degradação da vitamina C e dos CFT, uma vez que as energias de ativação demonstraram que as taxas de degradação sofrem variações acentuadas com o aumento das temperaturas de armazenamento, ressaltando a importância de controlar adequadamente a temperatura, durante o armazenamento, para preservar a qualidade física e nutricional dos pós.

Em suma, este estudo forneceu informações valiosas sobre o processo de secagem em leito de espuma da polpa de acerola e seu impacto na retenção de nutrientes e características físicas dos pós resultantes onde se destacaram as formulações à base de SPI. Além disso, o controle adequado da temperatura durante o armazenamento e a utilização de embalagens adequadas é essencial para preservar a qualidade dos produtos. Com tais conhecimentos, será possível explorar mais o potencial dessa técnica para a produção de alimentos funcionais e ingredientes alimentares com elevado valor nutricional.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação de outros tipos de frutas: Considerando os resultados promissores obtidos na secagem em leito de espuma da polpa de acerola, seria interessante expandir o estudo para outras frutas com potencial nutricional similar. A análise de diferentes frutas poderia proporcionar um maior entendimento sobre a aplicabilidade dessa técnica em diversas matérias-primas e ampliar o leque de possibilidades para a indústria de alimentos.
- Investigação de novos agentes espumantes, como outras proteínas de origem vegetal: A pesquisa pode explorar a utilização de outros agentes espumantes e combinações para a produção de pós. Testar diferentes substâncias e propor novas formulações pode levar a resultados ainda mais otimizados em termos de retenção de nutrientes e características físicas dos pós.
- Estudos sobre aplicações específicas dos pós de acerola: Além do uso como ingrediente alimentar, a exploração de possíveis aplicações específicas dos pós de acerola, como em suplementos nutricionais, alimentos funcionais, ou até mesmo em produtos de cuidados pessoais ou farmacêuticos, pode criar novas oportunidades para a utilização dessa matéria-prima.
- Segurança microbiológica dos pós de acerola: Investigar a segurança microbiológica dos pós de acerola durante o armazenamento é fundamental para garantir a qualidade e a inocuidade dos produtos. Análises periódicas para monitorar a presença de microrganismos patogênicos ou deteriorantes ao longo do período de armazenamento permitiriam identificar potenciais riscos à saúde.
- Avaliação sensorial do pó de acerola: O aspecto sensorial é essencial para a aceitação do produto pelo consumidor. Portanto, realizar estudos para avaliar a aceitabilidade, preferência e comportamento do consumidor em relação ao pó de acerola é importante para verificar a sua viabilidade comercial. Análises de sabor, aroma e aparência podem fornecer informações valiosas sobre a percepção sensorial do produto.
- Estudos sobre a viabilidade econômica: Para que a tecnologia de secagem em leito de espuma seja implementada em escala comercial, é fundamental realizar estudos de viabilidade técnica e econômica em diferentes escalas de produção, buscando a otimização do processo, o que, estimularia a implementação dessa tecnologia na indústria alimentícia.

APÊNDICE A – Parâmetros de atividade de água (Tabela A.1), umidade (Tabela A.2), vitamina C (Tabela A.3), compostos fenólicos totais (Tabela A.4) e cor (Tabela A.5) dos pós de acerola avaliados durante 60 dias de armazenamento

Os valores de atividade de água estão representados na Tabela A.1, enquanto os valores de umidade são apresentados na Tabela A.2. Ambas as tabelas mostram dados referentes a amostras de pó de acerola obtidas com diferentes agentes espumantes, as quais foram armazenadas por um período de 60 dias em diferentes temperaturas.

Tabela A.1 – Atividade de água dos pós de acerola em diferentes temperaturas durante o armazenamento

Tempo (dias)	Atividade de água (média ± desvio padrão)					
	10%SPI - 5°C	10%SPI- 25°C	10%SPI- 35°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 5°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 25°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 35°C
0	0,162±0,004	0,162±0,004	0,162±0,004	0,176±0,006	0,176±0,006	0,176±0,006
10	0,218±0,009	0,238±0,010	0,217±0,003	0,212±0,006	0,249±0,004	0,221±0,010
20	0,261±0,005	0,325±0,005	0,272±0,003	0,225±0,005	0,301±0,028	0,269±0,001
40	0,264±0,006	0,400±0,016	0,327±0,005	0,264±0,006	0,363±0,010	0,307±0,003
60	0,306±0,020	0,422±0,017	0,336±0,002	0,314±0,009	0,448±0,020	0,348±0,001

Tabela A.2 – Umidade (g água/100 g pó de acerola) dos pós de acerola em diferentes temperaturas durante o armazenamento

Tempo (dias)	Umidade (g água/100 g pó de acerola) (média ± desvio padrão)					
	10%SPI - 5°C	10%SPI- 25°C	10%SPI- 35°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 5°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 25°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 35°C
0	2,17±0,02	2,17±0,02	2,17±0,02	2,19±0,07	2,19±0,07	2,19±0,07
10	3,12±0,03	3,69±0,01	3,69±0,08	2,75±0,07	3,82±0,11	3,16±0,06
20	3,56±0,14	4,51±0,04	3,82±0,06	3,83±0,04	5,39±0,11	3,86±0,09
40	3,90±0,12	7,24±0,14	5,49±0,07	4,04±0,12	6,39±0,12	4,94±0,06
60	5,17±0,04	7,51±0,05	5,89±0,02	5,24±0,14	8,60±0,26	5,75±0,05

Tabela A.3 – Conteúdo de vitamina C (mg de vitamina C/ 100g de matéria seca) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas durante 60 dias

Tempo (dias)	Conteúdo de vitamina C (mg de vitamina C/ 100g de matéria seca)					
	10%SPI - 5°C	10%SPI- 25°C	10%SPI-35°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 5°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 25°C	0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 35°C
0	11601,76±147,41	11601,76±147,41	11601,76±147,41	12118,40±361,62	12118,40±361,62	12118,40±361,62
10	11114,97±199,30	10564,10±303,41	10431,05±28,30	11693,37±199,34	10859,83±295,16	10715,12±111,61
20	10926,33±213,77	9648,87±351,32	9654,71±364,12	11502,54±133,81	10370,23±437,70	9931,23±163,29
40	10762,18±434,88	9021,13±636,77	8286,12±150,23	11251,13±205,23	10111,37±466,15	9866,49±158,61
60	10634,94±432,41	8527,12±359,21	6488,15±52,68	11056,06±466,51	8768,60±455,80	6714,98±172,91

Tabela A.4 – Conteúdo de compostos fenólicos totais (mg EAG/100g de matéria seca) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas durante 60 dias

Tempo (dias)	10%SPI - 5°C	10%SPI- 25°C	10%SPI-35°C	0,07%D +	0,07%D +	0,07%D +
				0,15%L e	0,15%L e	0,15%L e
				0,5%SPI_ 5°C	0,5%SPI_ 25°C	0,5%SPI_ 35°C
0	13229,60± 400,12	13229,60± 400,12	13229,6±400,12	14275,93±309,03	14275,93±309,03	14275,93±309,03
10	13309,40±1274,83	13769,30±1499,95	13663,26±427,52	13908,33±188,61	14211,77±512,40	13610,7±1121,39
20	13818,85 ± 237,30	13511,00± 54,40	13186,71±259,56	12484,34±321,11	12004,75±217,73	12004,54±116,81
40	12699,09±270,87	11844,65±243,49	11419,91±55,67	12811,88±279,54	12134,92±407,55	10873,39±277,13
60	11586,06±229,15	10764,15±1126,62	9048,73±377,08	11770,02±379,15	10883,51±401,99	8627,05±379,83

Tabela A.5 – Parâmetros de cor (L*, a*, b*, C*, h e ΔE) dos pós de acerola armazenados nas diferentes temperaturas 5, 25 e 35 °C durante 60 dias de armazenamento

Tratamentos	Tempo (dias)	L*	a*	b*	C*	h*	ΔE
1%SPI - 5°C	0	59,58±2,70	18,08±1,69	26,47±1,12	32,07±1,83	55,73±1,54	-
	10	59,87±1,74	17,76±1,01	27,85±1,51	33,04±1,81	57,47±0,12	1,45
	20	59,06±1,77	18,01±0,88	28,38±0,34	33,61±0,71	57,62±1,01	1,98
	40	58,31±2,43	14,85±2,53	28,14±1,69	31,85±2,63	62,39±2,83	3,85
	60	57,92±1,14	17,19±0,18	30,34±0,83	34,87±0,79	60,45±0,52	4,30
1%SPI - 25°C	0	59,58±2,70	18,08±1,69	26,47±1,12	32,07±1,83	55,73±1,54	-
	10	58,55±0,88	15,84±0,19	31,26±0,60	35,05±0,59	63,14±0,35	5,39
	20	56,42 ±0,98	15,88±0,13	34,6±0,99	38,07±0,94	65,33±0,50	9,00
	40	46,70±1,27	15,85±0,51	35,19±1,54	38,6±1,57	65,74±0,59	15,71
	60	45,14±0,23	15,61±0,54	33,94±1,64	37,36±1,72	65,29±0,32	16,44
1%SPI_35°C	0	59,58±2,31	18,08±1,69	26,47±1,12	32,07±1,83	55,73±1,54	-
	10	56,09±0,31	15,79±0,30	33,58±0,43	37,11±0,49	64,81±0,28	8,24
	20	53,41±0,37	15,82±0,33	35,03±0,38	38,44±0,47	65,70±0,27	10,79
	40	48,41±1,61	16,35±0,66	37,9±0,22	41,28±0,34	66,67±0,84	16,08
	60	43,22±0,58	15,68±0,14	33,66±0,31	37,14±0,28	65,01±0,29	18,03
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 5°C	0	57,32±1,27	21,74±0,87	28,61±0,60	35,93±1,01	52,78±0,53	-
	10	53,53±0,46	23,89±0,16	30,96±0,25	39,1±0,26	52,34±0,21	4,95
	20	54,11±0,55	23,02±0,67	31,66±0,71	39,14±0,96	53,98±0,30	4,61
	40	53,95 ±1,27	22,98±0,90	31,30±1,04	38,83±1,35	53,73±0,40	4,49
	60	53,13 ±1,45	20,99±0,55	32,5±0,77	38,7±0,74	57,14±0,86	5,77
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 25°C	0	57,32±1,27	21,74±0,87	28,61±0,61	35,93±1,01	52,78±0,53	-
	10	54,60 ±0,36	19,82±0,25	35,37±0,3	40,54±0,18	60,73±0,48	7,54
	20	52,83±1,18	19,04±0,16	37,79±0,89	42,32±0,86	63,25±0,37	10,57
	40	48,84±0,56	18,72±0,33	39,14±0,45	43,38±0,52	64,44±0,29	13,85
	60	41,92±0,12	16,73±0,04	34,74±0,08	38,56±0,08	64,28±0,08	17,32
0,07%D + 0,15%L e 0,5%SPI_ 35°C	0	57,32±1,27	21,74±0,87	28,61±0,6	35,93±1,01	52,78±0,53	-
	10	52,17±0,81	20,56±0,64	36,83±1,30	42,2±0,80	60,79±1,63	9,77
	20	48,98±0,18	19,65±0,09	39,79±0,19	44,38±0,19	63,72±0,12	14,10
	40	44,44±0,31	19,24±0,12	38,44±0,20	43,52±1,87	63,20±0,69	16,39
	60	34,97±0,06	17,36±0,11	31,69±0,16	36,13±0,11	61,26±0,17	22,98