

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 30/08/2025



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 leite 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]
D_{eff}	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.

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.