

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Alexandre Delmiro Cabral Junior**  
**Victória Vieira Coelho**



CARACTERIZAÇÃO E MICROENCAPSULAMENTO DO  
ÓLEO DE ABACATE (*Persea americana*) POR SPRAY  
DRYER.

Rio de Janeiro

2024

Alexandre Delmiro Cabral Junior

Victória Vieira Coelho

CARACTERIZAÇÃO E MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO DE ABACATE  
(*Persea americana*) POR SPRAY DRYER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro de Alimentos e Engenheira de Alimentos.

Orientador(es): Prof.<sup>a</sup> Suely Pereira Freitas, DSc  
Kamila de Sá Oliveira, MSc

Rio de Janeiro

2024

## CIP - Catalogação na Publicação

D381c Delmiro Cabral Junior, Alexandre  
Caracterização e microencapsulamento do óleo de abacate (Persea americana) por spray dryer. / Alexandre Delmiro Cabral Junior. -- Rio de Janeiro, 2024.  
85 f.

Orientadora: Suely Pereira Freitas.  
Coorientadora: Kamila de Sá Oliveira.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia de Alimentos, 2024.

1. microencapsulamento. 2. óleo de abacate. 3. Alimentos. 4. Estabilidade oxidativa. 5. Avocado Hass. I. Pereira Freitas, Suely, orient. II. de Sá Oliveira, Kamila, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Alexandre Delmiro Cabral Junior

Victória Vieira Coelho

## CARACTERIZAÇÃO E MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO DE ABACATE

(*Persea americana*) POR SPRAY DRYER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro e Engenheira de Alimentos.

Aprovado em 25 de janeiro de 2024.

---

Suely Pereira Freitas, DSc, Escola de Química/UFRJ

---

Kamila de Sá Oliveira, MSc, Escola de Química/UFRJ

---

Julio Page de Castro, DSc, IFRJ

---

Carolina Vieira Viegas, DSc, UFRJ

Rio de Janeiro  
2024

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais, Ana Cristina e Alexandre, Telma e Wilson, por todo amor e dedicação para que pudéssemos caminhar na vida acadêmica e profissional, tendo a melhor educação que podiam nos oferecer. Vocês foram fonte de energia e motivação para enfrentar todas as dificuldades que tivemos ao longo do caminho que não foi fácil;

Dedicamos um agradecimento especial aos nossos irmãos Ana Julia e Wilson, por serem parceiras incansáveis nessa jornada;

À professora Suely e a Kamila, que nos orientaram por essa trajetória, onde pudemos aprender muito a cada encontro e sempre muito didáticas. A paciência e a confiança de vocês foi fundamental, especialmente no desenvolvimento deste trabalho;

À UFRJ e seu corpo docente, agradecemos por fornecerem os conhecimento necessários para nos tornar Engenheiros de Alimentos responsáveis;

A todos os que compartilharam experiências no LABOV, agradecemos pela oportunidade de aprendizado e pela disposição em ajudar nos momentos de necessidade. Um agradecimento especial a Meire Ferreira, pela orientação e ensinamentos no laboratório, e a Julio Page, por toda contribuição acadêmica e por suas valiosas lições;

Aos amigos que fizemos durante o curso, Brunna, Carine, Carol Braga, Carol Nogueira, Erllen, Bruno, Giovanna e Vanessa; Karina, Anna, Nathália, Elisa e Lucas. Também ao Matheus, companheiro, parceiro e confidentes de todos os momentos. Agradecemos por ouvir nossas reclamações nos momentos difíceis, por trazer alegria nos momentos tristes e por me ajudar a superar os desafios;

E a todos os outros que contribuíram para que chegássemos a esse ponto.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

DELMIRO CABRAL JUNIOR, Alexandre; VIEIRA COELHO, Victória. **Caracterização e microencapsulamento do óleo de abacate (*Persea americana*) por spray dryer**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A crescente demanda acerca de produtos derivados do abacate está associado à presença de compostos antioxidantes, sendo o tocoferol (vitamina E) um dos principais compostos de interesse pelas indústrias de cosméticos e farmacêutica, devido às suas propriedades regenerativas. O óleo extraído do abacate contém altas concentrações desses compostos e, devido às suas propriedades químicas, vem sendo recomendado na dieta humana, bem como em diversas aplicações industriais. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo principal avaliar o impacto do processo de microencapsulamento por *spray dryer* na estabilidade oxidativa do óleo de abacate. Para este fim, a cinética de secagem da polpa, etapa prévia a extração do óleo, foi avaliada e o modelo de Page apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. O óleo extraído por prensagem foi analisado para determinação dos índices de qualidade, especificamente o índice de acidez, índice de peróxido e estabilidade oxidativa. Os baixos valores obtidos para os índices de acidez e peróxido e o elevado tempo de indução (36,76 h) indica que as principais propriedades funcionais do óleo foram preservadas após as etapas de pré-tratamento térmico e extração. Também foram investigados alguns parâmetros operacionais durante o microencapsulamento do óleo de abacate com CAPSUL® e maltodextrina, obtendo-se uma eficiência de secagem em torno de 95%. Os altos valores obtidos para tempo de indução das micropartículas (20 h) indicou que o processo de microencapsulamento não afetou de forma significativa a estabilidade oxidativa do óleo. O produto apresentou isotermas de sorção do Tipo II características de sistemas contendo macro e mesoporos. Além disso, pela análise de MEV, as condições de operação do *spray dryer* deram origem a micropartículas com diâmetro entre 5 e 25 micrometros e sem fissuras.

Palavras-chave: Avocado Hass. Secagem. Micropartículas. Alimentos. Estabilidade oxidativa.

## ABSTRACT

DELMIRO CABRAL JUNIOR, Alexandre; VIEIRA COELHO, Victória. **Caracterização e microencapsulamento do óleo de abacate (*Persea americana*) por spray dryer.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The high demand in products derived from avocados is attributed to the presence of antioxidant compounds, with tocopherol (vitamin E) standing out as a key compound for the cosmetics and pharmaceutical industries, due to its regenerative properties. Avocado oil, rich in these compounds, is already integrated into human diets and various industrial applications owing to its favorable physical and chemical properties. In this context, this study aimed to assess the impact of the spray dryer microencapsulation process on the oxidative stability of avocado oil. To achieve this, the drying kinetics of the pulp, which is the precursor step to oil extraction, was assessed, and the Page model demonstrated the best fit to the experimental data. The oil, obtained through pressing, underwent some analysis to determine quality indices, including acidity index, peroxide index, and oxidative stability. The observed low values for acidity and peroxide indices, along with an extended induction time (36.76 h), suggest that the major functional properties of the oil were preserved after thermal pretreatment and extraction step. Furthermore, several operational parameters were investigated during the microencapsulation of avocado oil by spray drying using CAPSUL® and maltodextrin as wall materials, resulting in a drying efficiency of around 95%. The obtained values for the induction time of the microparticles (20 h) indicated that the microencapsulation process did not significantly impact the oxidative stability of the oil. The product exhibited Type III sorption isotherms, which are characteristic of weak interactions in systems containing macro and mesopores. Furthermore, through SEM analysis, the operating conditions of the spray dryer resulted in microparticles with diameters ranging from 5 to 25 micrometers and without fissures.

Keywords: Avocado Hass. Drying process. microparticles. food. oxidative stability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Variedades De Abacate Mais Comercializadas No Brasil.....	20
Figura 2 – Abacate Variedade Hass E Sua Frutificação.....	21
Figura 3 – Comparação Da Disponibilidade De Abacate Nos Países (2012 Vs 2022). ....	22
Figura 4 - Série Histórica Da Quantidade Produzida De Abacate No Brasil. ....	23
Figura 5 – Média Mundial De Exportação De Frutas Tropicais De Janeiro De 2020 A Agosto/Setembro De 2022, Usd/Ton. ....	24
Figura 6 – Maiores Frutas Tropicais: Participação Preliminar No Ano De 2022 No Volume De Exportações Por Tipo, Medido Em Bilhões De Dólares, Em Toneladas. ....	24
Figura 7 - Esquema De Funcionamento Da Extração Por Prensagem. ....	28
Figura 8 - Principais Morfologias Das Microcápsulas. ....	31
Figura 9 - Mecanismo Geral Do Equipamento Spray Dryer. ....	34
Figura 10 - Isotermas De Sorção E Dessorção Característica De Alimentos.....	38
Figura 11 - Classificação Das Curvas De Isotermas, De Acordo Com Brunauer. ....	38
Figura 12 – Representação Esquemática Da Metodologia Utilizada. ....	41
Figura 13 - A Esquerda, Saída Do Processo De Extração A Frio, Óleo E Torta. A Direita, Óleo De Abacate Obtido.....	44
Figura 14 - Emulsão Formada Pelo Óleo De Abacate E Materiais De Parede Seleccionados. .	47
Figura 15 - Spray Dryer De Escala Laboratorial Da Marca Labplant. ....	48
Figura 16 - Representação Esquemática Do Equipamento Rancimat Para Avaliação De Estabilidade Oxidativa.....	49
Figura 17 – Esquema Ilustrativo Das Seleções Utilizadas Para A Análise De Dados. ....	52
Figura 18 - Aspecto Da Polpa De Abacate Após O Processo De Secagem. ....	55
Figura 19 – Cinética De Secagem À 50°C, Dados Experimentais Não Linearizados E Dados Experimentais De Alves (2014). ....	57
Figura 20 - Cinética De Secagem À 50 °c, Dados Experimentais E Estimados Pelo Modelo De Page E Fick.....	59

Figura 21 – Micrografias Eletrônicas Das Micropartículas Obtidas No Ensaio 1. ....	65
Figura 22 - Micrografias Eletrônicas Do Óleo De Abacate Microencapsulado.....	66
Figura 23 - Gráfico De Umidade De Equilíbrio Média ( $X_{eq}$ ) Vs Atividade De Água ( $A_w$ ) Das Amostras.....	69
Figura 24 – Ajuste Não-Linear Aos Dados De Umidade Do Equilíbrio E Atividade De Água. ....	70
Figura 25 – Representação Esquemática Da Operação Do Spray Dryer. ....	82

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Quantidade De Ômega 3 E 6 Em Diferentes Óleos Comestíveis, Em Composição Para 100g De Óleo.....	27
Tabela 2 - Métodos Utilizados Para Encapsulação E Tamanhos Das Cápsulas.....	32
Tabela 3 - Avaliação Das Alterações Nos Parâmetros Do Processo De <i>Spray Drying</i> .....	35
Tabela 4 - Proporção Mássica Dos Componentes Na Emulsão .....	46
Tabela 5 – Condições Operacionais Utilizadas Nos Ensaios De <i>Spray Dryer</i> .....	47
Tabela 6 - Atividade De Água Das Soluções Salinas Utilizadas. ....	51
Tabela 7 - Distribuição Das Massas Do Fruto Após Pré-Tratamento. ....	54
Tabela 8 - Dados Brutos Da Análise Da Secagem Das Amostras. ....	55
Tabela 9 - Dados Da Cinética De Secagem.....	57
Tabela 10 – Parâmetros Dos Modelos Ajustados.....	59
Tabela 11 – Índice De Acidez Para Óleos Vegetais E Recomendação Da Anvisa. ....	62
Tabela 12 – Resultados Experimentais De Umidade Para Os Ensaios 1 E 2.....	63
Tabela 13 – Resultados Experimentais De Eficiência Para Os Ensaios 1 E 2 .....	63
Tabela 14 – Comparação Dados Experimentais E Dados De Dresch (2022). ....	64
Tabela 15 - Dados Experimentais Obtidos Para Estabilidade Oxidativa Das Amostras.....	66
Tabela 16 - Massas Das Amostras E Umidade De Equilíbrio ( $X_{eq}$ ) Após Uma Semana Mantidas Em Dessecadores Contendo Diferentes Soluções Salinas Supersaturadas.....	68
Tabela 17– Parâmetros De Ajuste Dos Dados Experimentais Ao Modelo Gab. ....	70
Tabela 18 - Dados Necessários Para Realização Dos Cálculos.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CEAGESP	Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo
VLDL	<i>very low-density lipoprotein</i>
LDL	<i>low density protein</i>
HDL	<i>High Density Lipoproteins</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
OMS	Organização Mundial da Saúde
MAE	<i>Microwave Assisted Extraction</i>
BET	Brunauer, Emmett e Teller
GAB	Gugghenheim, Anderson e de Boer
CADEG	Mercado Municipal do Rio de Janeiro
AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
IP	Índice de peróxido
AOCS	<i>American Oil Chemists' Society</i>
IUPAC	<i>STANDARD METHODS FOR THE ANALYSIS OF OILS</i>
EQ-UFRJ	Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro
PM	Peso molecular
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
VC	Volume de controle

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\omega_6$	Ômega 6
$\omega_3$	Ômega 3
$\mu\text{m}$	Micrometro ( $1 \times 10^{-6}$ m)
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$a_w$	Atividade de água
$X_{\text{eq}}$	Umidade de equilíbrio
$X_m$	Umidade na monocamada em base seca
C	Constante de Guggenheim
K	Entalpia de sorção na monocamada
N	Normalidade
$Q_{\text{parede}}$	Quantidade de calor perdida na parede da câmara de secagem (kJ/h)
$H_{\text{ent},i}$	Entalpia de entrada na câmara de secagem (kJ/h)
$H_{\text{sai},i}$	Entalpia de saída na câmara de secagem (kJ/h)
$R^2$	Coefficientes de correlação
$X_i$	Umidade inicial em base seca
$m(t)$	Massa da amostra em função do tempo
$X_{\text{bs}}$	Umidade em base seca
U	Umidade adimensional (Kg água/Kg ar seco)
$D_{\text{eff}}$	Coefficiente de difusão efetivo ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
L	Semi-espessura da amostra (1,0 mm)
$T_{\text{ar,ent}}$	Temperatura do ar de entrada ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{\text{ar,sai}}$	Temperatura do ar de saída ( $^{\circ}\text{C}$ )
G	Vazão mássica de ar ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$T_{\text{ref}}$	Temperatura de referência ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\dot{m}_{emul}$	Vazão mássica de emulsão (g/h)
$c_{pemul}$	Capacidade calorífica da emulsão (kcal/Kg°C)
$c_{par}$	Capacidade calorífica do ar (kcal/Kg°C)
$\dot{m}_{água, evap}$	Vazão de água evaporada (mL/h)
$\lambda_{temp}$	Entalpias de vaporização
$A_{parede}$	Área da parede da câmara de secagem (m <sup>2</sup> )
H	Altura da câmara de secagem (m)
D	Diâmetro da câmara de seacagem (m)
$Q'_{parede}$	Calor perdido por m2 da câmara de secagem (kJ/h.m <sup>2</sup> )

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
3.1 O ABACATE E SEU ÓLEO .....	20
3.2 EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE ABACATE .....	27
3.3 MICROENCAPSULAMENTO.....	30
3.3.1 <i>Visão Geral</i> .....	30
3.3.2 <i>Spray Drying</i> .....	33
3.4. ISOTERMAS DE SORÇÃO.....	37
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
4.1. MATÉRIA-PRIMA E PRÉ-TRATAMENTO DOS FRUTOS .....	42
4.2. SECAGEM DA POLPA.....	43
4.2.1. <i>Cinética de secagem</i> .....	43
4.2.2 <i>Determinação do teor de lipídios</i> .....	43
4.3. EXTRAÇÃO DO ÓLEO POR Prensagem a Frio .....	44
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO EXTRAÍDO.....	45
4.4.1. <i>Índice de Peróxido</i> .....	45
4.4.2. <i>Índice de acidez</i> .....	45
4.5. MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO POR <i>SPRAY DRYING</i> .....	46
4.5.1. <i>Preparo da emulsão</i> .....	46
4.5.2. <i>Operação do Spray Dryer</i> .....	47
4.6. CARACTERIZAÇÃO DAS MICROPARTÍCULAS .....	49
4.6.1. <i>Estabilidade oxidativa</i> .....	49
4.6.2. <i>Umidade</i> .....	50
4.6.3. <i>Isotermas de sorção</i> .....	50
4.6.3.1. Procedimento experimental .....	50
4.6.3.2. Análise de dados .....	51
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
5.1. PRÉ-TRATAMENTO DOS FRUTOS .....	54

5.2. SECAGEM .....	55
5.2.1 <i>Cinética de secagem</i> .....	55
5.2.2 <i>Teor de lipídios</i> .....	59
5.3. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO EXTRAÍDO.....	61
5.3.1 <i>Índice de Peróxido</i> .....	61
5.3.2 <i>Índice de acidez</i> .....	61
5.4. OPERAÇÃO DO SPRAY DYER .....	63
5.5. MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO POR SPRAY DRYING.....	65
5.5.1 <i>Caracterização do microencapsulado</i> .....	65
5.5.1.1 Estabilidade Oxidativa.....	66
5.5.1.2 Isotermas de sorção.....	68
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>73</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca mundialmente como grande produtor de frutas tropicais, tanto nativas como cultivadas, devido às condições climáticas favoráveis à fruticultura, também ao seu extenso território e investimentos em ciência e tecnologia no setor. Atualmente, é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, com mais de 40 milhões de toneladas por ano (EMBRAPA, 2021). Dentre as principais atividades econômicas do país, tem-se uma agroindústria de frutas exóticas bem desenvolvida, sendo um dos segmentos mais relevantes do Brasil, que corresponde a mais de 35% de sua produção agrícola (MOREIRA *et al.*, 2013).

Na última década, o abacate tem se destacado no setor mundial de frutas. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) projeta que o abacate se tornará a fruta tropical mais comercializada até 2030, com as exportações globais superando quatro milhões de toneladas, acima das vendas externas de manga e de abacaxi, superada apenas pela banana. No Brasil, a produção de abacate vem crescendo desde 2009, mas de forma mais expressiva desde 2015. Segundo o IBGE (2023), tal situação levou o país a ocupar o sétimo lugar no ranking mundial. Tradicionalmente, o cultivo do abacate se dava para alimentação, por possuir alto valor nutritivo, e também para propósitos medicinais, por suas características terapêuticas (RANADE *et al.*, 2015). Atualmente, a principal motivação para aumento na oferta de produtos à base de abacate se deve aos benefícios para a saúde humana promovidos pelo consumo deste fruto. Além do elevado teor de minerais, potássio em particular, o fruto contribui para absorção de cálcio. Adicionalmente, contém elevado teor de lipídios, com predominância de ácidos graxos monoinsaturados. Segundo reportado por diversos estudos, o óleo de abacate retém a maior parte dos fitoquímicos e carotenoides presentes na fruta (SANTANA, *et al.*, 2015).

É notável a crescente demanda por óleos vegetais contendo compostos bioativos, principalmente pela versatilidade de aplicações, podendo ser utilizados como insumo nas indústrias química, alimentícia e farmacêutica, assim como diretamente na dieta humana. Alguns compostos se destacam por despertarem maior interesse comercial, como os ácidos graxos insaturados, fitosteróis, tocoferóis, compostos fenólicos e carotenoides (SINGH, 2015). Alguns óleos vegetais têm sua aplicação limitada devido às suas propriedades químicas e físicas, como: elevada composição em ácidos graxos saturados, baixo ponto de fusão e baixa estabilidade oxidativa. Uma das alternativas para retardar a oxidação lipídica e ampliar suas formas de aplicação é submeter os óleos vegetais ao processo de microencapsulamento. Sua aplicação em óleos vegetais ricos em ácidos graxos, como o óleo de abacate, é recomendada,

pois além de proteger os ácidos graxos essenciais  $\omega 3$  e  $\omega 6$ , reduz a perda dos compostos termossensíveis, como vitaminas e carotenoides. Por se tratar de um processo contínuo com baixo tempo de contato com a fonte de calor (em média 30 segundos), esta técnica pode ser usada para compostos termossensíveis. O microencapsulamento do óleo de abacate vem sendo reportado na literatura, tanto para otimização das condições de operação do *spray dryer*, como também otimização dos materiais de parede utilizados para o revestimento das micropartículas.

## 2. OBJETIVOS

### OBJETIVO GERAL

Obter um produto em pó derivado do óleo de abacate Hass, extraído por prensagem a frio, visando à aplicação em formulações de alimentos funcionais.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar modelos semi-empíricos para ajuste de dados de secagem da polpa de abacate por convecção forçada;
- Conduzir análises específicas para avaliar os índices de qualidade do óleo de abacate prensado a frio;
- Definir as condições de operação do processo de microencapsulamento por *spray dryer* a partir de uma emulsão contendo o óleo de abacate;
- Ajustar os dados de sorção das micropartículas pelo modelo de GAB;
- Avaliar a microestrutura das micropartículas;
- Avaliar o efeito do microencapsulamento na estabilidade oxidativa das micropartículas obtidas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 O ABACATE E SEU ÓLEO

O abacate é um dos frutos mais populares no Brasil e, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), ocupou a 15ª colocação em volume de vendas e 12ª colocação em movimentação financeira no ranking de vendas dentre as 70 variedades de frutas comercializadas em 2021 na Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), a maior central de abastecimento da América Latina (COSTA SAMPAIO E WHATELY, 2022).

Os relatos históricos sobre o abacate têm início no descobrimento das Américas. Na Colômbia e México, o abacate já era conhecido por volta de 1519 a 1526, e 1532 a 1550, respectivamente. O fruto era amplamente conhecido pelos povos originários da América e foi tradicionalmente cultivado para fins alimentícios e medicinais (RANADE *et al.*, 2015). A introdução oficial da cultura do abacateiro no Brasil se deu em 1893, por meio da doação de sementes provenientes da Guiana Francesa, fornecidas à família real (ALVES PEREIRA, 2015).

São conhecidas mais de 500 variedades de abacate, sendo as mais comercializadas no Brasil: Avocado Hass, Breda, Fortuna, Geada, Margarida, Ouro verde e Quintal. A sazonalidade das variedades de abacate depende das condições climáticas que influenciam na produção. O gênero *Persea* é originário do México e América central, contém 150 espécies, dentre elas, 70 se desenvolvem em regiões tropicais e subtropicais (RANADE *et al.*, 2015). A árvore possui porte médio-alto, variando de 12 a 25 metros. A planta possui caule cilíndrico e lenhoso com coloração cinza escuro. Suas folhas são sem estípulas, de pecíolo curto e alternadas, podendo apresentar diversos formatos e tamanhos como ilustrado na Figura 1 (ALVES PEREIRA, 2015).

**Figura 1 - Variedades de abacate mais comercializadas no Brasil.**



Fonte: <https://abacatesdobrasil.org.br/>

O nome ‘Avocado’ foi derivado da palavra ‘*ahucatl*’ do idioma asteca (RANADE *et al.*, 2015). O peso do avocado Hass (Figura 2) pode variar entre 200 g e 300 g (FLORES *et al.*, 2019). Diferentes valores de teor de água, entre 60 e 70%, foram reportados na literatura. Em base úmida, o teor de óleo na polpa é da ordem de 21%, 7% na casca, e 2% na semente (TAN *et al.*, 2017). A casca representa cerca de 28% do fruto, a polpa, 59%, e a semente, 13% (DAIUTO *et al.*, 2012).

**Figura 2 – Abacate variedade Hass e sua frutificação.**



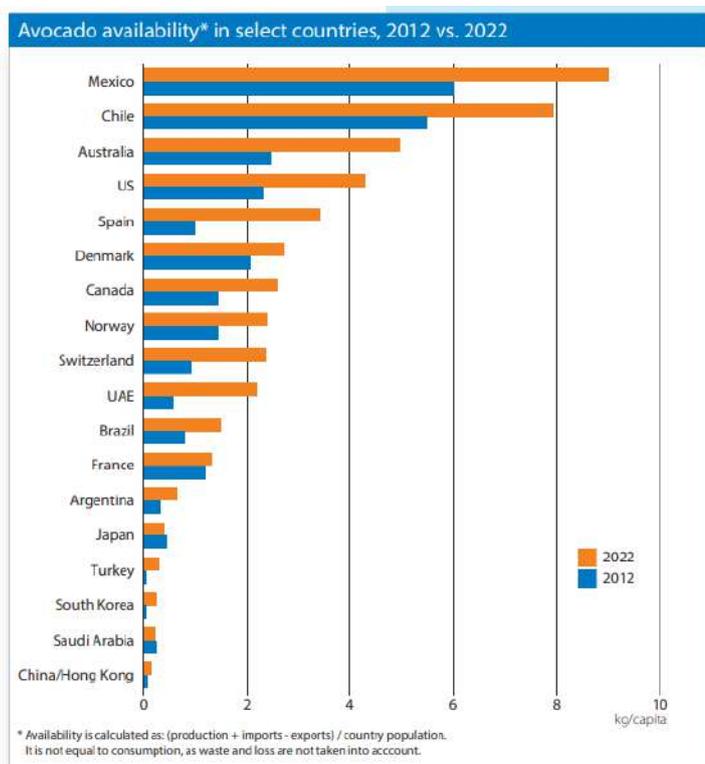
Fonte: “Avocado - Muda formada por semente”. Disponível em: <https://www.jardimexotico.com.br/avocado-muda-formada-por-semente> e DONADIO (2015).

O abacate é reconhecido como uma fruta muito valiosa devido às suas propriedades organolépticas e perfil nutricional, que compreende componentes como vitaminas (B1, B2, C, D e E), minerais (cobre, manganês, magnésio, fósforo, potássio e zinco), ácidos graxos monoinsaturados, esteróis, polifenóis, proteínas, fibras alimentares, entre outros. Além disso, o abacate está relacionado a certas características de proteção à saúde, como: antioxidante, antiobesidade, hipoglicemiante, anti-hipertensivo e antimicrobiano (RANADE *et al.*, 2015; AGUIAR *et al.*, 2020; ARAÚJO *et al.*, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2020). Segundo a *American Dietetic Association* (1999), a suplementação dietética com a polpa de abacate promove diversos benefícios para a saúde. Isso não se deve apenas ao aspecto nutritivo da fruta, mas também à sua capacidade de aumentar a absorção de nutrientes de outros alimentos, em particular do cálcio e carotenoides. Como exemplo, o estudo de Unlu e colaboradores (2015) comprovou que a adição de abacate a saladas e molhos aumenta a absorção de carotenoides pelo organismo.

Diversos estudos corroboram a ação benéfica do fruto em balancear as taxas de colesterol, além de atuar na prevenção de doenças como o diabetes. O conteúdo lipídico do óleo de abacate, principalmente de ácidos graxos monoinsaturados, está associado a benefícios para o sistema cardiovascular e efeitos anti-inflamatórios (FLORES *et al.*, 2019). Além disso, Brai *et al.* (2007) avaliaram esse mesmo efeito utilizando o extrato de folhas do abacateiro, nesse estudo foi observada uma redução o colesterol VLDL e LDL sem afetar os níveis de HDL em ratos doentes, mostrando que, além do fruto apresentar esses benefícios, outras partes da árvore também podem ser exploradas.

Segundo o Instituto de pesquisa *RaboResearch Food & Agribusiness*, a produção de abacate mundialmente alcança uma taxa de crescimento anual de cerca de 7% na última década, atingindo 8,4 milhões de toneladas métricas em 2022. Na Figura 3 está ilustrada graficamente a evolução da disponibilidade de abacate nos principais países produtores do mundo. O México continua sendo o maior produtor, com quase 2,5 milhão de toneladas (30%) do total, sendo a variedade Hass a mais produzida, compondo 97% da produção mexicana, segundo relatório de mercado elaborado pela *Mordor Intelligence*.

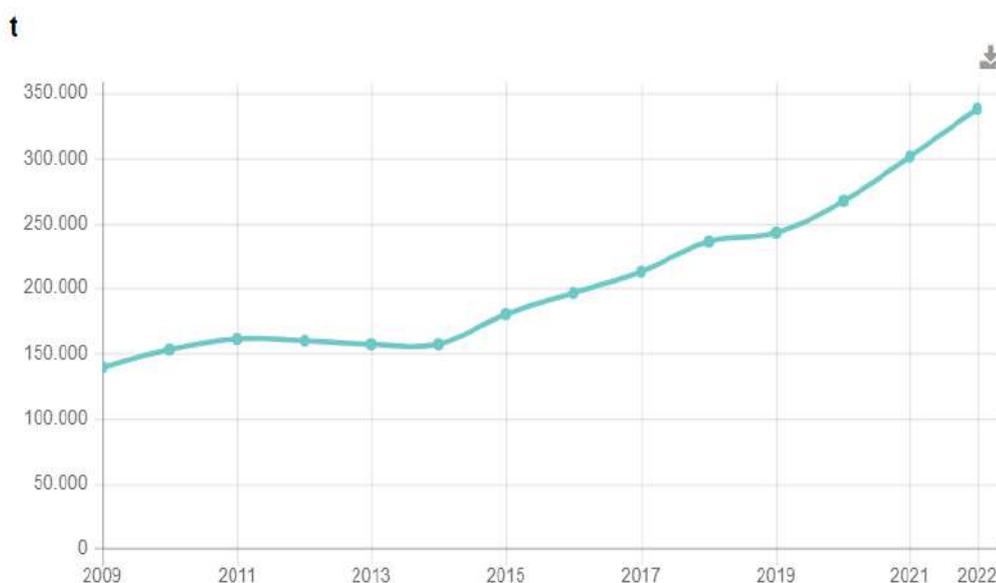
**Figura 3 – Comparação da disponibilidade de abacate nos países (2012 vs 2022).**



Fonte: Rabobank (2023).

No Brasil, o abacate é cultivado em quase todos os estados, sendo São Paulo o maior estado produtor, seguido de Minas Gerais e Paraná, segundo o IBGE com dados atualizados em 2022. Também em 2022, o Brasil produziu cerca de 338 mil toneladas, como pode ser observado na Figura 4 do IBGE, em 19 mil hectares cultivados. O abacate apresenta um rendimento médio de 17.421 kg por hectare, superior a diversos cultivares, como a soja, por exemplo, de 3.445 kg por hectare, e amendoim, 3.896 kg por hectare (IBGE, 2022, MAPA, 2023). No país, as empresas agrícolas continuam investindo no cultivo de abacates especialmente no fruto da variedade Hass. Este setor está direcionado tanto no desenvolvimento do mercado interno quanto nas exportações. A maior empresa de cultivo do abacate Hass no país colheu cerca de 5 mil toneladas em 2021 (EXAME AGRO,2022).

**Figura 4 - Série histórica da quantidade produzida de abacate no Brasil.**

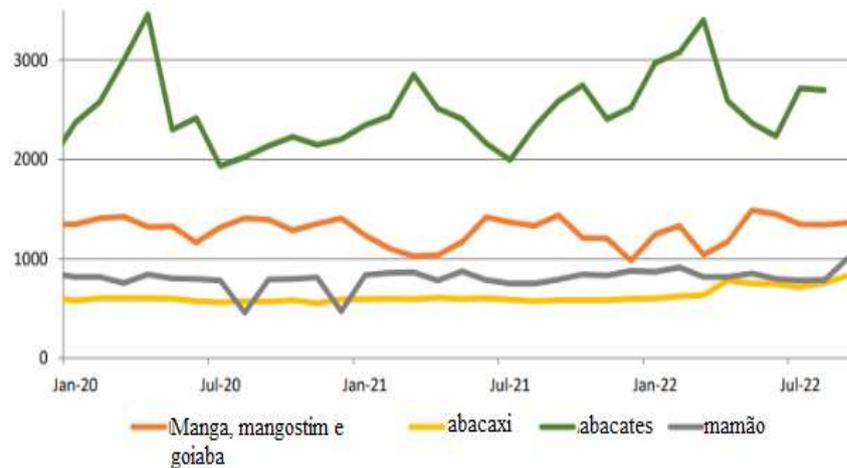


Fonte: IBGE, 2023.

A participação do Brasil nas exportações globais da fruta, contudo, ainda é muito baixa. Atualmente, o país é o 20º maior exportador mundial, principalmente devido ao baixo teor de óleo nas principais variedades cultivadas no Brasil. No entanto, este perfil está mudando em razão do aumento do cultivo do abacate Hass nos últimos 20 anos. O México, Peru, Chile, Quênia e África do Sul são, atualmente, os principais exportadores deste fruto. Em termos de valor, o abacate continuará a representar mais de 50% do comércio global das principais frutas tropicais em 2022 (Figura 5) devido ao valor unitário médio de exportação significativamente

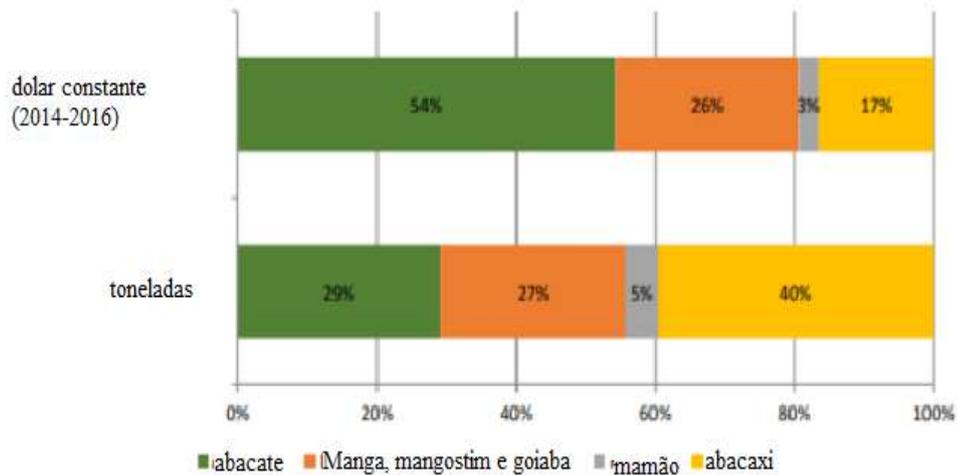
mais alto dessa fruta (Figura 6) que normalmente é um múltiplo do valor médio de exportação do valor unitário do abacaxi (FAO, 2022).

**Figura 5 – Média mundial de exportação de frutas tropicais de Janeiro de 2020 a Agosto/Setembro de 2022, USD/ton.**



Fonte: Adaptado de FAO, 2022.

**Figura 6 – Maiores frutas tropicais: participação preliminar no ano de 2022 no volume de exportações por tipo, medido em bilhões de dólares, e em toneladas.**



Fonte: Adaptado de FAO, 2022.

O óleo de abacate vem sendo utilizado em grande escala no setor de cosméticos desde o início do século XX pelas suas características funcionais, em particular como hidratante. Mais recentemente, pelas suas características sensoriais (principalmente pelo *flavor* único), o óleo extra-virgem de abacate, obtido por prensagem a frio, vem sendo comercializado para consumo

como azeite *gourmet*. A nível industrial, é crescente o interesse pela produção de alimentos saudáveis que possam manter as suas propriedades nutricionais ao longo do tempo, o que favorece o uso do óleo e seus derivados (FLORES *et al.*, 2019).

Segundo reportado por diversos estudos, o óleo de abacate retém a maior parte dos fitoquímicos e carotenoides presentes na fruta (SANTANA, *et al.*, 2015). Também contém  $\beta$ -sitosterol, lecitina, minerais e vitaminas lipossolúveis (RANADE *et al.*, 2015). Dentre os compostos antioxidantes presentes no abacate, o tocoferol (vitamina E) se destaca como um dos principais compostos de interesse pelas indústrias de cosméticos e farmacêutica, devido às suas propriedades regenerativas. Possui rápida absorção pela pele e ação restauradora do colágeno, tendo efeitos positivos no tratamento de dermatites, inflamações, queimaduras, acne e no pós-cirúrgico para acelerar a cicatrização, prevenindo a formação de marcas e queloides na pele (AGUIAR *et al.*, 2020; NOGUEIRA-DE-ALMEIDA *et al.*, 2018). Além disso, confere redução à tensão superficial, formando emulsões mais fluidas, propriedade esta que potencializa seu uso na formulação de cosméticos (SIHVONEN *et al.*, 1999). Os possíveis efeitos biológicos do óleo de abacate podem contribuir de forma relevante para a prevenção e tratamento de doenças por meio da alimentação (FLORES *et al.*, 2019). Essas evidências levaram a um aumento significativo de seu consumo e produção nos últimos 50 anos em todo o mundo.

Pesquisas reportam que o óleo proveniente da variedade Hass pode conter até 71% de ácidos graxos monoinsaturados, 13% de ácidos graxos polinsaturados e 16% de ácidos graxos saturados (DREHER e DAVENPORT, 2013; FORERO-DORIA *et al.*, 2017; SANTANA, 2015). Em estudos de caracterização realizados no fruto da variedade Hass, provenientes do México, Austrália, Estados Unidos e Nova Zelândia, constatou-se que o abacate contém 62% de lipídeos, sendo oleico (42-51%) e palmítico (20-25%) os ácidos graxos majoritários. Os triacilgliceróis majoritários são OOO (21-34%) e OOP (19-24%), onde O e P denotam os ácidos oleico (C18:1) e palmítico (C16:0), respectivamente (TAN *et al.*, 2017). O óleo de abacate tem uma estabilidade térmica de aproximadamente 176 °C e possui, em média, menor concentração de compostos fenólicos totais do que o azeite de oliva. Apesar disso, a atividade antioxidante do óleo de abacate é semelhante à do azeite (FORERO-DORIA *et al.*, 2017).

Woof e colaboradores (2009) propuseram uma classificação para o óleo de abacate com base no método de extração e na qualidade do fruto. O óleo de abacate de qualidade superior, ou “extra virgem”, equivale ao óleo produzido a partir de fruta de alta qualidade, sem o uso de solventes químicos e extraído apenas por métodos mecânicos, a baixas temperaturas (inferior a 50 °C). O óleo de abacate “virgem” corresponde ao produzido com frutos de qualidade inferior (com pequenas áreas de contaminação microbiológica e alterações físicas), mantendo o mesmo

método de extração do óleo “extra virgem”. Já o óleo de abacate “puro” corresponde ao óleo para cuja produção a qualidade do fruto não é importante. Neste caso, o óleo deve ser submetido aos processos de branqueamento e desodorização e, em alguns casos, associado ao sabor natural de ervas ou frutas. E, por último, o óleo de abacate “misto” é aquele combinado com óleos vegetais de outras fontes e, portanto, apresenta características sensoriais e químicas variáveis.

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece o regulamento técnico para óleos vegetais no Brasil na Resolução RDC nº 270 e informa que a qualidade de óleos vegetais deve seguir as normas estabelecidas no *Codex Alimentarius* - FAO/OMS, porém não há alegações específicas para o óleo de abacate. Alguns dos parâmetros estabelecidos são: acidez para óleos refinados máxima de 0,6 mg KOH/g e para óleos prensados a frio e não refinados, de 4,0 mg KOH/g; índice de peróxidos para óleos refinados máxima de 10 mEq/kg e para óleos prensados a frio e não refinados, de 15 mEq/kg (ANVISA, 2005)

Além de todas as vantagens do óleo de abacate já listadas, ainda vale ressaltar a ausência de ômega 6 ( $\omega 6$ ), considerado um ácido graxo pró-inflamatório, diferente do óleo de oliva, cujo teor de  $\omega 6$  é aproximadamente 9,0 %. A ação pró-inflamatória do  $\omega 6$  está associada ao aumento da produção de citocinas que tem ação vasoconstritora, ou seja, está diretamente relacionada a doenças cardiovasculares, autoimunes e inflamatórias (LETRO *et al.*, 2021).

A relação entre os dois ácidos graxos essenciais ( $\omega 6/\omega 3$ ) vem ganhando destaque por possuir um papel importante fator ao longo do ciclo de vida na dieta humana. Tal situação ocorre devido a uma competição entre os ácidos graxos das famílias n-6 e n-3 pelas enzimas biossintéticas envolvidas nas reações de dessaturação e alongamento da cadeia. Ou seja, o nível desses ácidos graxos essenciais na dieta influencia diretamente na absorção do  $\omega 3$  (MARTIN *et al.*, 2006; SIMOPOULOS, 2016; LETRO *et al.*, 2021). Apesar de haver diferentes recomendações de proporções ideais entre  $\omega 6$  e  $\omega 3$  que devem ser ingeridos na dieta, há uma convergência para os intervalos entre 1:4 e 1:5 (MARTIN *et al.*, 2006). Na Tabela 1, foram agrupadas as quantidades de  $\omega 6$  e  $\omega 3$  no óleo de abacate e em diferentes óleos comestíveis. A partir dos dados reportados, pode-se notar que o óleo de abacate tem uma ação anti-inflamatória superior aos óleos vegetais mais consumidos no mundo.

**Tabela 1 - Quantidade de ômega 3 e 6 em diferentes óleos comestíveis, em composição para 100g de óleo.**

	Ômega 3 (g)	Ômega 6 (g)
Óleo de Abacate	Traços	Traços
Azeite de Oliva	Traços	8.74
Azeite de Dendê	0.83	15.69
Óleo de Canola	6.78	20.87
Óleo de Soja	5.72	53.85
Óleo de Girassol	0.39	62.22

Fonte: Elaboração própria com dados de Food Standards Australia, 2014 e TACO, 2011.

### 3.2 Extração do óleo de abacate

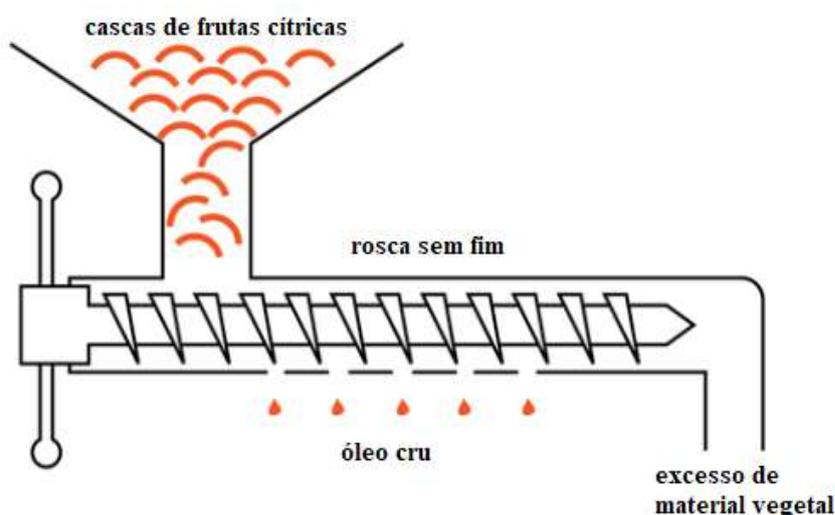
Dentre os processos de extração do óleo de abacate já reportados na literatura, podem-se enumerar: extração por prensagem mecânica, extração por solventes orgânicos (a quente ou a frio), extração enzimática, extração supercrítica, extração assistida por ultrassom e extração assistida por microondas. A escolha do método de extração do óleo é uma etapa fundamental para o processo e depende do objetivo final que se deseja alcançar, uma vez que cada processo possui vantagens e desvantagens. Na revisão realizada por Flores e colaboradores (2019) são reportados diversos estudos que avaliaram o efeito do método de extração na qualidade, estabilidade, rendimento e bioatividade dos compostos presentes no óleo de abacate. Além disso, os autores reuniram diferentes estudos que analisam simultaneamente o efeito do método de secagem da polpa e do processo de extração do óleo.

Santana *et al.* (2015) demonstraram que a secagem por micro-ondas resulta em um óleo com estabilidade oxidativa muito superior aos métodos de secagem com ar quente e liofilização. Este resultado está de acordo com estudo de Krumreich *et al.* (2018), no qual a secagem sob vácuo seguida da prensagem mecânica resulta em um óleo com excelentes propriedades bioativas e com índices de qualidade superior, se comparado com o processo de secagem por meio de convecção forçada com ar quente. Isto se deve à baixa concentração de oxigênio no processo conduzido em micro-ondas e sob vácuo. Entretanto, Del Castillo-Llamosas *et al.* (2021) reportaram que o teor de vitamina E é maior quando a polpa é seca com ar a 60 °C. Independentemente do método de secagem, o fruto maduro apresenta eficiência de extração superior à do fruto verde. Isso se deve à degradação enzimática da parede celular durante a maturação. O principal obstáculo para obtenção do óleo é o alto teor de umidade, que afeta,

simultaneamente, o rendimento da extração, a qualidade do óleo e seu custo de produção (AGUIAR *et al.*, 2020).

O método de prensagem a frio é conduzido por meio de uma prensa tipo rosca sem fim, ou *expeller pressing*, como esquematizado na Figura 7. Para óleos comerciais derivados de polpa, como palma e oliva, a prensagem é o processo mais utilizado, por se tratar da opção mais sustentável. Apesar de apresentar menores rendimentos se comparado ao método convencional de extração com solventes orgânico, pode ser reproduzido em larga escala com menor custo operacional e menores impactos ambientais e na saúde. Se comparado com o método de extração convencional que utiliza hexano ou éter de petróleo como solvente, o óleo prensado a frio apresenta maiores concentrações de compostos com atividade anti-oxidante como  $\alpha$ -tocoferol e esqualeno, bem como menores teores de compostos indesejados, como campestero l e acetato de cicloartenol (DOS SANTOS, 2014; FLORES, 2019).

**Figura 7 - Esquema de funcionamento da extração por prensagem.**



Fonte: Adaptado de <https://glorybee.com/process-of-essential-oil-extraction>

A extração por solvente, embora apresente alto rendimento em óleo, é pouco seletiva, o que ocasiona o arraste de muitas substâncias indesejáveis, além de deixar traços de solventes, tornando necessárias etapas de purificação e refino. A extração com fluidos supercríticos, principalmente com dióxido de carbono, dispensa etapas de purificação e refino, apresenta alta seletividade, porém baixos rendimentos, sendo limitada pela escala quando se trata de commodity, além de apresentar um elevado custo operacional (FLORES, 2019).

Uma das técnicas mais modernas que vem sendo avaliada em estudos acadêmicos é a extração de óleos e gorduras combinada com micro-ondas, do inglês *Microwave Assisted*

*Extraction* (MAE). Esta técnica apresenta como benefício a maior eficiência na extração promovida pela ruptura da parede celular. Além disso, previne a oxidação indesejada dos lipídios, pois promove a inativação de enzimas lipolíticas durante o processo. Trata-se de uma técnica moderna com apelo ecológico, entretanto, sua viabilidade econômica ainda não foi comprovada. Segundo Jorge e colaboradores (2021), o óleo extraído da polpa por MAE apresenta alta estabilidade oxidativa e baixa acidez.

A extração auxiliada com uso de ultrassom utiliza as forças de cavitação produzidas por ondas acústicas que promovem a ruptura das paredes celulares do fruto, o que facilita a extração do óleo. O processo pode melhorar a separação do óleo e potencialmente reduzir o tempo de batelada em processos industriais, sem afetar a qualidade do óleo (DEL CASTILLO-LLAMOSAS, 2021).

### 3.3 MICROENCAPSULAMENTO

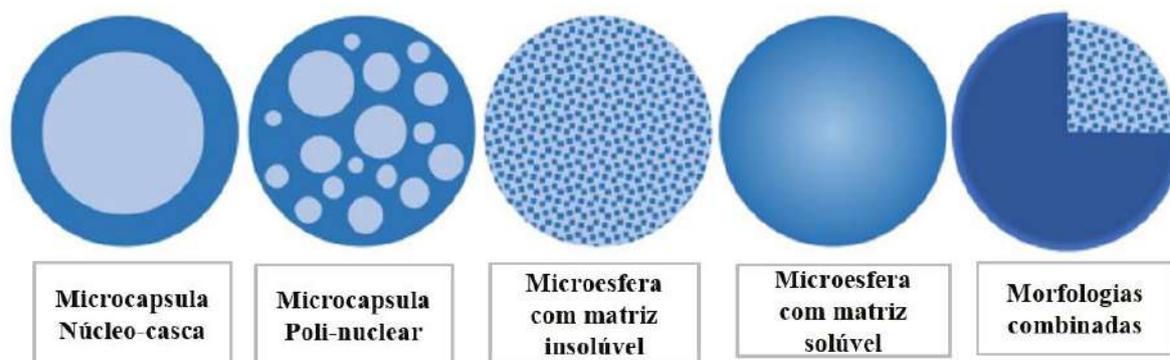
#### 3.3.1 Visão Geral

O processo de microencapsulamento é caracterizado pelo revestimento de pequenas partículas sólidas, líquidas ou gasosas, com o objetivo de proteger esses compostos de condições ambientais adversas, como umidade, luz, oxigênio e interações indesejadas com outros componentes. Para esse processo, é fundamental a escolha adequada do material de parede que será utilizado, para que se obtenha um produto com as características desejadas. O material da parede permite a proteção dos biocompostos, pois forma uma barreira física entre o composto do núcleo e outros componentes do sistema. Além disso, o microencapsulamento pode permitir a liberação controlada do conteúdo encapsulado sob condições específicas (MORE e WAGH, 2014; FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2008; GHARSALLAOUI. *et al.*, 2007). O material de parede pode ser de diferentes naturezas como carboidratos, proteínas e lipídeos, e deve possuir alguns atributos específicos, como por exemplo, ser compatível com a matriz que se deseja realizar o processo, sem que haja qualquer alterações sensoriais e funcionais do produto final (GERANPOUR *et al.*, 2020). Além disso, outras características importantes são analisadas para a escolha do material de parede ideal como: ser biodegradável, acessível, solúvel nos solventes típicos, ter baixa higroscopicidade, boa característica emulsificante, estabilidade e flexibilidade.(VEIGA *et al.*, 2019).

Conforme reportado por Da Silva-Buzanello e colaboradores (2019), inicialmente os compostos microencapsulados despertaram o interesse da indústria farmacêutica para a liberação controlada de medicamentos e vacinas. Posteriormente, seu uso foi estendido para aplicação na indústria alimentícia, principalmente para utilização de compostos funcionais em formulações. Essa técnica é recomendada como forma de aumentar a estabilidade de lipídeos funcionais, já que ácidos graxos poliinsaturados são suscetíveis a processos oxidativos, o que reduz a vida útil/tempo de prateleira de óleos, além de acarretar a formação de compostos de degradação que dão origem a compostos voláteis indesejados ou *off-flavors* (OLIVEIRA, 2021). Os componentes encapsulados podem ser denominados de “núcleo” ou “material encapsulado”, enquanto a barreira externa pode ser chamada de “material de parede” ou “material encapsulante” (ALMEIDA, 2022). A morfologia das micropartículas varia de acordo com o material de parede e do método utilizado no processo, como ilustrado na Figura 8. As

microcápsulas estão representadas de uma forma regular mas, em geral, apresentam irregularidades, além de combinações das morfologias ilustradas.

**Figura 8 - Principais morfologias das microcápsulas.**



Fonte: ARENAS-JAL, 2020.

São diversas as técnicas desenvolvidas para microencapsulamento, dentre elas tem-se: *spray drying*, liofilização, polimerização, entre outras. No caso da polimerização, o material de parede é formado ao longo do processo (ARENAS-JAL, 2020). Na Tabela 2, adaptada com dados de Favaro-Trindade *et al.* (2008), os autores reuniram as técnicas descritas na literatura relacionando o estado físico do material a ser encapsulado e também o tamanho final das cápsulas obtidas pelo método. Vale ressaltar que, independentemente da técnica utilizada, o material de parede deve ser inerte e aprovado para a aplicação desejada, e o processo deve garantir a estabilidade dos princípios ativos e a manutenção de suas propriedades funcionais.

Na literatura já foi reportado a aplicação da técnica do microencapsulamento em diversos óleos vegetais com diferentes aplicações. Zanin e colaboradores (2021) obtiveram microcápsulas com óleo de café torrado, por *spray drying*, para adição em formulações de café solúvel e capuccino instantâneo, para prolongar a liberação do aroma de café. Ullah e colaboradores (2020) avaliaram o preparo de uma manteiga enriquecida com óleo de chia microencapsulado, também por *spray dryer*, com quitosana como material de parede. Os autores reportaram que o processo de microencapsulamento aumentou a estabilidade oxidativa do óleo de chia e que a adição das micropartículas na formulação não alterou as características da manteiga e nem o seu tempo de prateleira. Já Golja *et al.* 2013 realizaram a elaboração de um tecido de algodão com fragrância, utilizando óleos essenciais microencapsulados de lavanda, alecrim e sálvia.

**Tabela 2 - Métodos utilizados para encapsulação e tamanhos das cápsulas.**

Métodos de encapsulação	Materiais Encapsuláveis	Faixa de Tamanho (nm)
<b>Métodos físicos</b>		
Extrução estacionária	Líquido/sólido/gás	1.000-6.000
Bocal submerso	Líquido/sólido/gás	700-6.000
Extrução centrífuga	Líquido/sólido/gás	125-3.000
Bocal vibrante	Líquido/sólido/gás	500-2.000
Spray drying	Líquido/sólido	5-150
Disco rotativo	Líquido/sólido	5-1.000
Pan Coating	Sólido	>500
Suspensão por ar	Sólido	50-10.000
Spray chilling e spray cooling	Líquido/sólido	20-200
Leito fluidizado	Sólido	>100
Co-cristalização	Sólido/líquido	-
Liofilização	Líquido	-
<b>Métodos Químicos</b>		
Polimerização interfacional	Líquido/sólido	1-500
Inclusão molecular	Líquido	5-50
Polimerização in Situ	Líquido/sólido	1-500
<b>Métodos físico-químicos</b>		
Coacervação simples	Líquido/sólido	20-500
Coacervação complexa	Líquido/sólido	1-500
Lipossomas	Líquido/sólido	0,02-3
Lipesferas	Líquido/sólido	0,02-10
Evaporação do solvente	Líquido/sólido	1-5.000

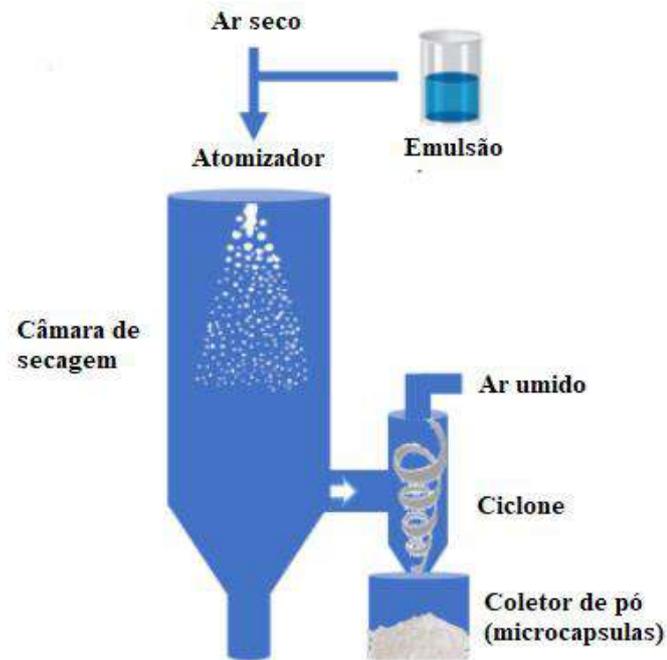
Fonte: Elaboração própria com dados de FAVARO-TRINDADE *et al.*, 2008.

### 3.3.2. Spray Drying

Entre as técnicas de microencapsulamento, a mais comum na indústria alimentícia é o *spray drying*, por apresentar baixo custo operacional, grande disponibilidade e baixa complexidade de operação (GHARSALLAOUI, A. *et al*, 2007; GERANPOUR *et al.*, 2020). Sua aplicação para óleos vegetais é recomendada, pois além de proteger os ácidos graxos essenciais  $\omega 3$  e  $\omega 6$ , reduz a perda dos compostos termossensíveis, como vitaminas e carotenoides. Por se tratar de um processo contínuo com baixo tempo de contato com a fonte de calor (em média 30 segundos), esta técnica pode ser usada para compostos termossensíveis (ALMEIDA, 2022). Além disso, o produto sólido facilita o manuseio, armazenamento e transporte do material, e como vantagem adicional, beneficia a mistura e dispersão uniforme quando pequenas quantidades do componente precisam ser adicionadas na formulação de alimentos (BAE e LEE, 2008).

Para iniciar o processo de *spray drying*, é necessária uma etapa inicial de preparo de uma emulsão contendo o produto que se deseja microencapsular, os materiais de parede e o solvente. Geralmente são utilizados emulsificantes ou agitação com aquecimento, para garantir que o óleo, o material de parede e o solvente formem uma emulsão homogênea e estável. Para operação do *spray dryer*, a emulsão é alimentada no atomizador, como ilustrado na Figura 9. Essa etapa tem como objetivo a redução da área superficial da emulsão, por meio da formação de gotas micrométricas, para aumentar assim a eficiência da secagem. Na câmara de secagem, o líquido atomizado entra em contato com o ar quente, o qual promove a evaporação quase instantânea do solvente pela transferência de calor e massa com o ar em temperaturas elevadas (ARENAS-JAL, 2020). A câmara apresenta dois arranjos possíveis: processo contracorrente, onde o líquido atomizado é alimentado na direção oposta à corrente de ar, ou o processo co-corrente, onde os dois fluxos são configurados na mesma direção. Ao final, as microcápsulas formadas são separadas do ar úmido com auxílio de um ciclone.

**Figura 9 - Mecanismo geral do equipamento Spray dryer.**



Fonte: Adaptado de ARENAS-JAL, 2020.

Normalmente são obtidas partículas com diâmetros entre 1 e 50  $\mu\text{m}$ , mas tamanhos variando de 0,58 a 80  $\mu\text{m}$  foram relatados em estudos recentes, como apresentado no trabalho de revisão de Santos (2021). O tamanho das partículas obtidas e a eficiência do processo dependem do material de parede utilizado, das condições operacionais e das características do fluido atomizado. Na Tabela 3 estão explicitadas diferentes alterações nos parâmetros do processo e seus respectivos efeitos no produto obtido após a secagem.

**Tabela 3 - Avaliação das alterações nos parâmetros do processo de *spray drying***

Parâmetro do processo	Efeito no processo	Efeito no produto
Alta vazão de ar	Baixo tempo de residência na câmara de secagem; Possível arraste de partículas para o exaustor; Maior consumo energético;	Maior umidade residual;
Alta vazão da emulsão	Menor eficiência de secagem;	Maior tamanho das micropartículas; Maior umidade residual;
Maior temperatura do ar	Maior eficiência de secagem;	Menor umidade residual; Possíveis rachaduras nas paredes das partículas;

Fonte: Elaboração própria com dados de ALMEIDA, 2022.

No estudo de Maia (2021), não foi observada diferença significativa na eficiência do processo entre as vazões de ar entre 280 e 485 mL/h, entretanto, uma redução significativa na eficiência foi observada para a vazão de 695 mL/h. Os estudos reportam que, para temperaturas a partir de 150 °C, a vazão do ar não afeta tanto a umidade do produto final, visto que a secagem é praticamente instantânea. Além disso, temperaturas acima de 180 °C não são recomendadas, visto que podem causar a degradação de compostos bioativos de interesse contidas no produto (ALMEIDA, 2022).

Para o microencapsulamento de óleos vegetais, o material de parede escolhido deve ter propriedade emulsificante e, principalmente, evitar a separação das fases durante a secagem. Os materiais recomendados na literatura para esse caso são a maltodextrina, gelatina, goma arábica, goma xantana, amido modificado e pululano. Além disso, como se trata de aplicação para a indústria alimentícia, é importante garantir que o material de parede seja solúvel em água, apresente baixa viscosidade e propriedades de formação de filme (GHARSALLAOUI *et al.*, 2017).

Recentemente, foi avaliada a utilização de uma mistura de maltodextrina e amido octenil succinato de sódio (CAPSUL®) no processo de microencapsulamento de óleo de farelo de arroz (MAIA, 2021). Neste trabalho, o autor avaliou o efeito das proporções entre o material de

parede e óleo, na eficiência do processo e na qualidade do pó. Nas proporções de 1:3 ou 1:4 (óleo/material de parede) foi observado uma secagem mais eficiente, com consequente aumento na estabilidade dos compostos bioativos do núcleo (MAIA, 2021). O CAPSUL® é obtido por meio de modificações químicas do amido natural e, pelas suas características físicas e químicas, apresenta melhor retenção de óleos, baixa viscosidade e propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas (SILVA-JAMES, 2019).

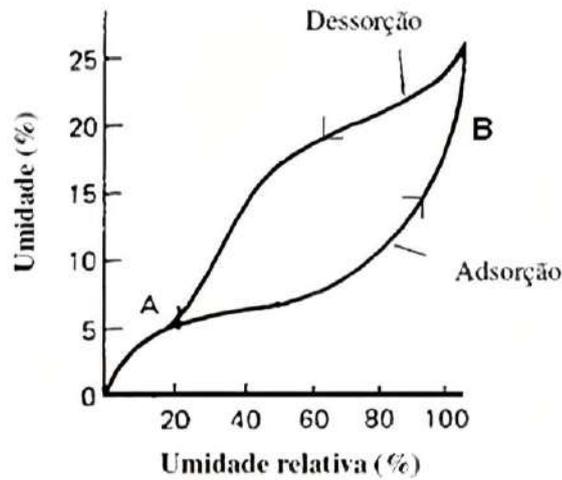
### 3.4. ISOTERMAS DE SORÇÃO

Após o processo de secagem, alguns parâmetros do produto são determinados, em particular seu teor de umidade, por meio do qual se avalia a eficácia do transporte de calor e massa. Outro parâmetro importante que deve ser estudado é a umidade de equilíbrio, definida como a umidade final que o produto pode atingir após um longo tempo de estocagem, durante o qual pode ganhar ou perder água para o meio ambiente. A umidade de equilíbrio também pode ser entendida como a umidade limite em que um produto pode ser desidratado, em uma determinada condição de temperatura e umidade do ar.

Para a avaliação da umidade de equilíbrio, são utilizadas isotermas de sorção, que podem ser definidas como representações gráficas que descrevem a relação de equilíbrio entre a quantidade de água sorvida pelos componentes do material e a umidade relativa do meio, em uma temperatura específica. As curvas de sorção são comumente utilizadas para descrever o fenômeno de adsorção e dessorção de umidade nos alimentos, produtos farmacêuticos e outros meios porosos, auxiliar na condução da secagem, estabelecer a umidade final ou a atividade de água ( $a_w$ ) do produto e estimar o teor de água mesmo em ambientes com diferentes temperaturas e umidades relativas, indicando as condições ideais para estocagem (ZEYMER, 2017).

As isotermas de sorção são obtidas por meio do armazenamento do produto em meios diferentes, onde são alteradas as condições de umidade relativa, mantendo-se a temperatura constante. Assim, pode-se relacionar a umidade de equilíbrio com as atividades de água em cada condição nas quais as amostras foram armazenadas. Os resultados obtidos nesses testes podem ser ajustados com o auxílio de modelos matemáticos e possibilitam a determinação da umidade da monocamada uma vez que na adsorção física podem formar-se camadas moleculares sobrepostas. O perfil típico das curvas de sorção está ilustrado na Figura 10, onde o fenômeno da dessorção está relacionado com a higroscopia do produto, enquanto a adsorção, com secagem.

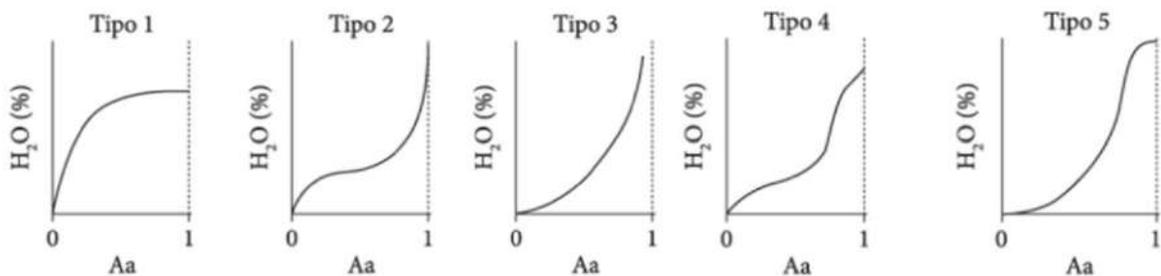
**Figura 10 - Isotermas de sorção e dessorção característica de alimentos.**



Fonte: Adaptado de BRUNAUER *et al.*, 1940.

Observa-se que as curvas não se sobrepõem, ou seja, para um mesmo valor de umidade existem dois de atividade de água, um para adsorção e outro para a dessorção, efeito denominado de histerese. O formato de uma isoterma de sorção depende de diversos parâmetros, como a estrutura, composição do material, pressão e temperatura. É preciso que ela seja determinada experimentalmente, uma vez que os métodos disponíveis não são capazes de simular sistemas tão complexos como os de alimentos. As isotermas de sorção foram classificadas por Brunauer em 1940 (PARK *et al.*, 2008) de acordo com seu formato, que estabeleceu cinco diferentes tipos, representados na Figura 11.

**Figura 11 - Classificação das curvas de isotermas, de acordo com Brunauer.**



Fonte: Adaptado de BRUNAUER *et al.*, 1940.

A primeira proposta de um conceito sobre fenômenos de sorção foi apresentada por Langmuir, que estabeleceu sua teoria quanto à adsorção sobre uma superfície não porosa,

idealmente infinita e não rugosa. As principais restrições do modelo foi considerar que a adsorção é um fenômeno monomolecular e que as moléculas adsorvidas não interagem entre si, além da igualdade entre as velocidades de equilíbrio dinâmico dos fenômenos da dessorção e da adsorção (Langmuir, 1916). Além disso, a Equação proposta (1) teve como hipótese uma distribuição uniforme em monocamada das moléculas adsorvidas sobre toda a superfície adsorvente.

$$\frac{a_w}{X_{eq}} = \frac{X_m}{C} + X_m a_w \quad (1)$$

onde:

$a_w$ : atividade de água;

$X_{eq}$ : umidade de equilíbrio;

$X_m$ : umidade na monocamada em base seca;

$C$ : constante de Guggenheim, que caracteriza o calor de sorção na primeira camada.

Diversas equações teóricas são reportadas na literatura, derivadas ou não da proposta de Langmuir, e foram desenvolvidas visando a modelagem das isotermas. Dentre elas, as equações de BET (Brunauer, Emmett e Teller) e GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer) são as mais comumente utilizadas quando se trata de produtos alimentícios (MOREIRA *et al.*, 2013; TIMMERMANN *et al.*, 2001).

O modelo de GAB é considerado uma generalização do modelo de BET, pois com a introdução de um terceiro parâmetro, este modelo considera as modificações do comportamento da umidade quando adsorvida. Além disso, compreende a formação da multicamada, que inclui uma ampla faixa de atividade de água (até 0,9), de forma que pode ser melhor ajustado a dados experimentais de alimentos (PARK *et al.*, 2008).

$$BET \quad X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1 - a_w)} \quad (2)$$

$$GAB \quad X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (3)$$

onde:

$X_{eq}$ : umidade de equilíbrio;

$X_m$ : umidade na monocamada em base seca;

C: constante de Guggenheim, caracteriza o calor de sorção na primeira camada;

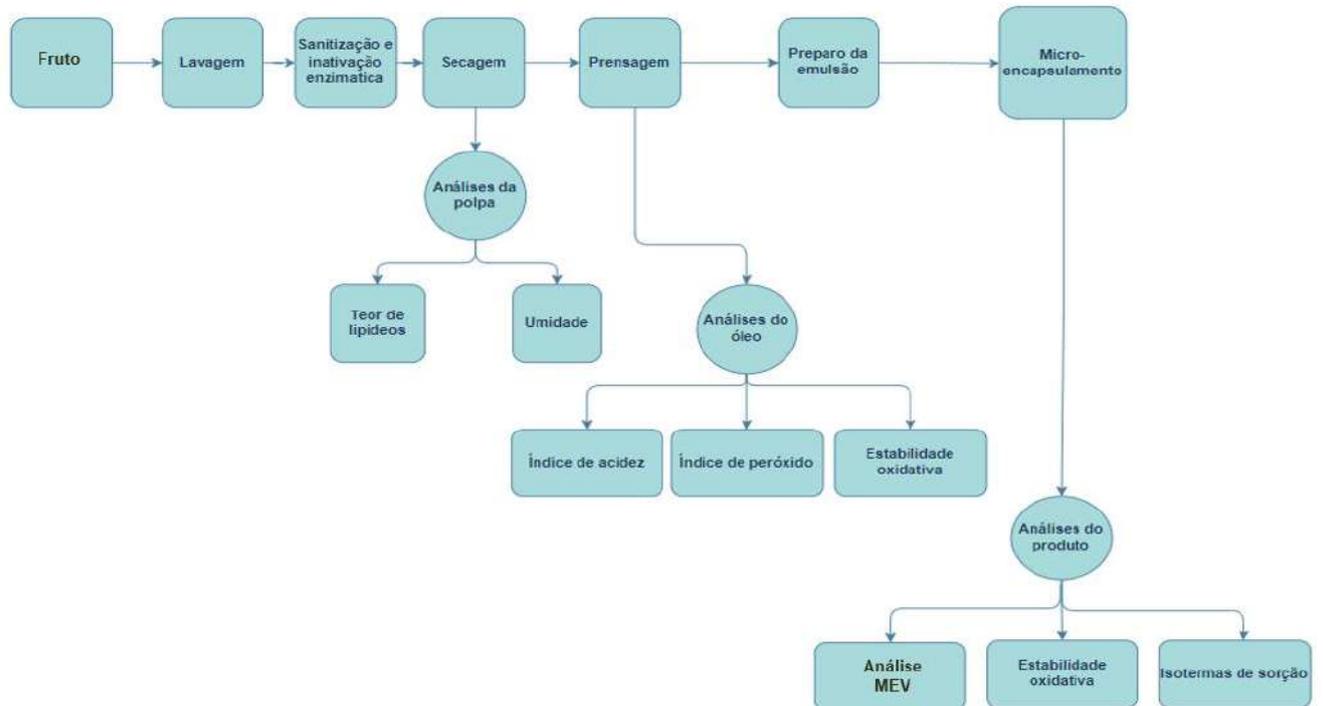
K: entalpia de sorção na monocamada;

$a_w$ : atividade de água do meio.

#### 4. METODOLOGIA

Na Figura 12 está ilustrado o fluxograma simplificado do processo utilizado neste trabalho.

**Figura 12 – Representação esquemática da metodologia utilizada.**



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.1. MATÉRIA-PRIMA E PRÉ-TRATAMENTO DOS FRUTOS

Para os ensaios experimentais foram utilizados 5,40 kg do abacate comerciais da variedade Hass (*Persea americana* Mill), comumente conhecido como avocado. Os frutos utilizados foram adquiridos no Mercado Municipal do Rio de Janeiro, CADEG RJ, e a compra foi realizada no dia 02/02/2023.

O pré-tratamento consistiu inicialmente em realizar a lavagem e sanitização dos frutos. Para isso, uma solução de hipoclorito de sódio contendo 2% a 2,5 % p/p de cloro ativo foi utilizada como agente sanitizante. Os frutos ficaram em imersão por 15 min e posteriormente lavados com água corrente. O pré-tratamento térmico foi conduzido em Autoclave Vertical Analógica (*Prismatec*) durante 5 minutos a 120 °C. A distribuição dos frutos no cesto da autoclave foi feita de maneira a favorecer o fluxo do vapor gerado e aumentar o contato do mesmo com a superfície dos frutos. Esse processo tem como objetivo principal inativar enzimas, em particular as lipases endógenas, além de estabilizar microbiologicamente o fruto, reduzindo significativamente o desenvolvimento de microrganismos adquiridos durante a colheita e pós-colheita. Após o processo de autoclavagem, o caroço foi removido e descartado, e a polpa foi congelada até o uso.

## 4.2. SECAGEM DA POLPA

Para aumentar a eficiência do processo de extração por prensagem e a qualidade final do óleo, a secagem foi realizada de forma a se obter uma umidade final inferior a 10%. Para isso, foi utilizado um secador de bandejas com ar convectivo a  $50 \pm 5$  °C. A polpa do fruto foi cortada em fatias para aumentar a superfície de contato, favorecendo assim o transporte de calor e, conseqüentemente, a taxa de secagem. A temperatura de secagem foi selecionada com base em dados reportados na literatura, de modo a causar menor impacto nas propriedades funcionais do fruto. A umidade final da polpa foi estabelecida com base em experimentos conduzidos por Santana *et al.* (2015), para a mesma variedade do fruto.

O monitoramento do processo foi realizado utilizando-se uma balança de umidade (MA145, Sartorius), até se alcançar uma umidade próxima à desejada. Para validação destes resultados, foi utilizado também o processo de determinação de umidade como recomendado pelo método AOAC 925.45b (*Association of Official Analytical Chemists*, 2000).

### 4.2.1. Cinética de secagem

Para a análise da cinética de secagem, a polpa foi submetida ao processo de secagem convectiva com ar a  $50$  °C  $\pm$   $5$  °C e umidade relativa de 31%. Pesou-se, em vidro de relógio, cerca de 3 g de polpa. As massas foram registradas durante 90 minutos, em intervalos de 15 minutos. Para determinação dos valores médios foram realizados cinco ensaios. Os dados obtidos foram ajustados pelos modelos de Page e Fick (CUNHA *et al.*, 2014).

Para determinação da umidade inicial em base seca e da umidade de equilíbrio no final da secagem, as amostras foram pesadas e levadas à estufa a 105 °C durante 60 minutos, de acordo com a norma AOAC 925.45b (*Association of Official Analytical Chemists*, 2000).

### 4.2.2 Determinação do teor de lipídios

Para a determinação do teor de lipídeos da amostra previamente seca, foi utilizado um extrator de gordura do tipo *Soxhlet*, onde a amostra permanece sob refluxo com éter de petróleo, como descrito pela AOAC 920.39 (*Association of Official Analytical Chemists*, 2000), até que praticamente todos os lipídios presentes na amostra se esgote. Cada ensaio foi realizado em triplicata, com 2,5 g de amostra de polpa seca.

### 4.3. EXTRAÇÃO DO ÓLEO POR PRENSAGEM A FRIO

A extração mecânica do óleo foi conduzida usando-se uma prensa contínua de rosca sem fim (*expeller pressing*) Prensa IBG Monforts (modelo CA590). A polpa seca foi alimentada na prensa por meio de um funil de alimentação, e, à medida que a massa é esmagada ao longo do parafuso, ocorre o escoamento do óleo pelos orifícios do cilindro. A torta desengordurada é retirada no final da prensa através de um orifício de 4 mm, como ilustrado na Figura 13. O rendimento do óleo extraído foi calculado em base seca.

**Figura 13 - A esquerda, saída do processo de extração a frio, óleo e torta. A direita, óleo de abacate obtido.**



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO EXTRAÍDO

##### 4.4.1. Índice de Peróxido

A determinação do índice de peróxido (IP) foi conduzida de acordo com a metodologia recomendada pela AOCS Cd 8-53 (*American Oil Chemists' Society*, 1993). De forma resumida, foi realizada a pesagem de 2,0 g de amostra em um erlenmeyer e dissolvida em 15 mL de uma solução de ácido acético glacial e clorofórmio nas proporções volumétricas de 3:2. Em seguida, foi adicionado 0,5 mL de solução saturada de iodeto de potássio (KI) e a mistura foi agitada manualmente de forma contínua durante 1 min. Após a agitação, foram adicionados 30 mL de água destilada e, a seguir, a amostra foi titulada com tiosulfato de sódio 0,01 N até apresentar uma coloração amarela. Nesse ponto, foi adicionado 0,5 mL de solução de amido e então prosseguiu-se com a titulação até apresentar uma coloração incolor. A análise foi realizada em triplicata. Para determinação do IP, utiliza-se a fórmula expressa pela Equação (4):

$$\text{Índice de peróxido} = \frac{(V-B) \times N \times 1000 \times f}{Ma} \quad (4)$$

onde:

V = volume de tiosulfato de sódio 0,01N consumido na neutralização da amostra (mL)

B = volume de tiosulfato de sódio 0,01N consumido na neutralização do branco (mL)

N = normalidade da solução de tiosulfato de sódio (0,01N)

f = fator de correção da solução de NaOH

Ma = massa de amostra (g)

##### 4.4.2. Índice de acidez

O índice de acidez indica o teor de ácidos graxos livres presentes no óleo e reflete a qualidade do mesmo. Para a quantificação desses compostos, foi utilizado procedimento padrão descrito pelo método IUPAC 2.201 (*STANDARD METHODS FOR THE ANALYSIS OF OILS*, 1922). Para estimar o valor médio, o experimento foi realizado em triplicata, utilizando-se 2,0 g de óleo e como titulante hidróxido de potássio na concentração de 0,01 N.

#### 4.5. MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO POR *SPRAY DRYING*

Para obtenção das micropartículas, foram usados como materiais de parede maltodextrina e amido modificado (CAPSUL®), ambos produzidos pela empresa *Ingredion*, na proporção mássica de 1:3, respectivamente. Essa escolha foi feita com base no estudo de Silva-James *et al.* (2019). Com esses materiais de parede e na referida proporção, os autores alcançaram os melhores resultados de eficiência no microencapsulamento do *blend* de óleos da semente de romã e de soja.

##### 4.5.1. Preparo da emulsão

As formulações das emulsões a serem alimentadas no *spray dryer* foram escolhidas com base na literatura e em dados já otimizados em pesquisas recentes do Laboratório de Lipídios e Derivados (EQ-UFRJ), e são apresentadas a seguir. Para o primeiro teste, utilizou-se uma proporção mássica de 1:3 (óleo:material de parede) e uma concentração total de sólidos de 25% em massa. Para o segundo teste, adotou-se a proporção mássica de 1:4 (óleo: material de parede) e concentração total de sólidos de 37,5% em massa. Com isso, foram obtidas as proporções mássicas descritas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Proporção mássica dos componentes na emulsão**

Componente	Concentração mássica (Ensaio 1)	Concentração mássica (Ensaio 2)
Água	75,00%	62,50%
CAPSUL®	12,50%	15,00%
Maltodextrina	6,25%	15,00%
Óleo de abacate	6,25%	7,50%

Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, foram combinados os materiais de parede com água em um homogeneizador de laboratório até uniformização da mistura. Em seguida, foi adicionado o óleo extraído e a mistura foi homogeneizada por cerca de mais 2 minutos para obtenção da emulsão desejada, que tem seu aspecto ilustrado na Figura 14.

**Figura 14 - Emulsão formada pelo óleo de abacate e materiais de parede selecionados.**



Fonte: Elaboração própria.

#### **4.5.2. Operação do *Spray Dryer***

Para a realização do experimento, foi utilizado um *spray dryer* de escala laboratorial, modelo SD-06 da marca LabPlant. O equipamento, contendo um bico atomizador e uma câmara de secagem, opera em fluxo concorrente e é equipado também com um ciclone para separação do produto seco e do ar úmido. A emulsão preparada previamente foi alimentada no *spray dryer*, como mostrado na Figura 15, nas condições operacionais descritas na Tabela 5. Além disso, foi utilizado o bico atomizador de 0,7 mm de diâmetro, a temperatura ambiente foi mantida a  $25 \pm 1$  °C e a umidade relativa do ar em cerca de 40%.

**Tabela 5 – Condições operacionais utilizadas nos ensaios de *spray dryer*.**

Ensaio	Temperatura (°C)	Vazão de alimentação (L.h <sup>-1</sup> )	Vazão de Ar (m <sup>3</sup> /h)
1	190	0,485	24,74
2	190	0,485	21,74

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 15 - Spray dryer de escala laboratorial da marca LabPlant.**



Fonte: Elaboração própria.

O estudo de Maia (2021) foi utilizado como referência para os parâmetros operacionais do equipamento. Segundo o autor, a vazão de alimentação da emulsão poderia atingir até 485 mL.h<sup>-1</sup> sem afetar significativamente a umidade do produto final. Essa vazão foi selecionada para que o experimento tivesse um menor tempo de execução e, conseqüentemente, maior produtividade. Já a vazão de ar foi ajustada para o menor valor possível, evitando o arraste das partículas pela corrente de ar. O autor observou que, para temperaturas elevadas, a vazão de ar não afeta de forma significativa a eficiência de secagem.

Antes da alimentação com a emulsão, o equipamento foi operado com água destilada por cerca de 10 minutos, para se atingir a temperatura de operação definida. Com a temperatura ajustada, a emulsão foi alimentada na câmara de secagem por meio de uma bomba peristáltica, sob agitação constante para garantir sua uniformidade e estabilidade. O produto, contendo o pó recuperado no ciclone e parte do pó retido em suas paredes, foi pesado ao final de 180 minutos, que foi o tempo de operação estabelecido para obtenção de uma quantidade suficiente do pó para os ensaios de caracterização.

Ao final do processo, foi calculada a quantidade de calor perdida na parede da câmara de secagem ( $Q_{parede}$ ), a partir de um balanço de energia do sistema de secagem, como ilustrado na Equação (5). Para esse cálculo, foram consideradas as hipóteses de que o sistema opera em estado estacionário, e que a variação de energia potencial e cinética, assim como o trabalho no interior do sistema são desprezíveis em relação aos demais termos do balanço.

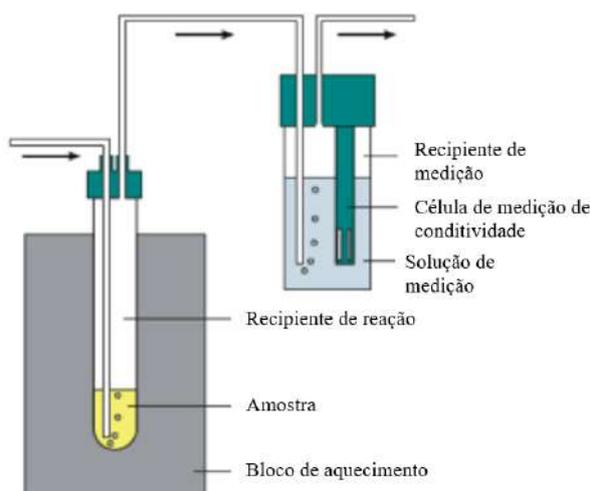
$$\sum_i^m \Delta H_{ent,i} - \sum_i^m \Delta H_{sai,i} - Q_{parede} = 0 \quad (5)$$

## 4.6. Caracterização das micropartículas

### 4.6.1. Estabilidade oxidativa

A estabilidade oxidativa avalia a presença de peróxidos no óleo, além de outros compostos de decomposição oxidativa, como aldeídos e cetonas. Esta análise foi realizada em duplicata tanto com o óleo extraído como com as micropartículas obtidas no processo de *spray drying*. Foram necessárias amostras de 3,0 g para conduzir o experimento no aparelho Rancimat (Metrohm modelo 743). Com aplicação do método AOCS Cd 12b-92 (*American Oil Chemists' Society*, 1992) e adotando como parâmetros a temperatura de 110 °C e vazão de ar de 10 L/h, as amostras foram submetidas ao processo oxidativo acelerado com ar, gerando compostos voláteis que são transferidos para a água, aumentando sua condutividade elétrica. Como resultado, obtém-se o tempo de indução para cada amostra, que permite a avaliação do efeito do tempo de armazenamento, bem como a eficiência do microencapsulamento na retenção dos compostos bioativos. O esquema do experimento foi ilustrado na Figura 16.

**Figura 16 - Representação esquemática do equipamento Rancimat para avaliação de estabilidade oxidativa.**



Fonte: Adaptado de KIVEVELE e HUAN, 2015.

#### 4.6.2. Umidade

A umidade do produto foi determinada após cada batelada, de forma a avaliar tanto a eficiência do microencapsulamento quanto o teor de umidade do pó obtido. Para isso, foi utilizada uma balança de umidade (MA145, Sartorius), seguindo o mesmo procedimento de monitoramento da umidade na secagem da polpa. O equipamento possui como mecanismo de funcionamento uma balança e uma unidade de aquecimento, composto por um radiador infravermelho que aquece e seca a amostra. Uma balança acoplada ao analisador registra seu peso continuamente, até massa constante, indicando ao final o teor de umidade da amostra.

Os testes de umidade foram feitos em triplicata, com 1 g de amostra, cada. O analisador de umidade indica um valor de porcentagem de massa seca, que é descontada de 100%, obtendo-se assim o valor da umidade. Para cada amostra, considerou-se a média das triplicatas realizadas.

#### 4.6.3. Isotermas de sorção

As curvas de sorção fornecem a relação da quantidade de água adsorvida em função da atividade de água do meio. A partir destas curvas, é possível estimar o teor de água no produto em ambientes com diferentes temperaturas e umidades relativas, indicando as condições ideais para estocagem do produto (ZEYMER, 2017).

##### 4.6.3.1. Procedimento experimental

A isoterma de sorção do pó foi determinada a partir do armazenamento das amostras em dessecadores contendo soluções salinas supersaturadas, simulando condições de umidade relativa do ambiente, além de um dessecador contendo água destilada. Os sais utilizados em cada dessecador e seus respectivos valores de atividade de água estão apresentados na Tabela 6. Para estimação das médias, os testes foram realizados em triplicata, onde foram dispostos em cada dessecador três suportes de polietileno com aproximadamente 1,0 g de amostra, cada. Durante o procedimento, a temperatura do laboratório foi mantida aproximadamente em 22 °C.

**Tabela 6 - Atividade de água das soluções salinas utilizadas.**

Sal	Atividade de água, a 25°C
LiCl	0,093
MgCl <sub>2</sub>	0,327
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,438
NaCl	0,753
BaCl <sub>2</sub>	0,903
H <sub>2</sub> O pura	1,000

Fonte: Elaboração própria.

Após uma semana, tempo suficiente para que o transporte de massa atinja o equilíbrio, as amostras foram retiradas e pesadas, para o cálculo da umidade de equilíbrio em base seca ( $X_{eq}$ ). Esta foi avaliada pela Equação (6), onde os valores de massa seca foram obtidos por diferença com auxílio da uma balança de precisão (FA2104N, Bioprecisa). O procedimento foi repetido também após duas semanas de armazenamento e os dados foram coletados.

$$X_{eq} = \frac{\text{massa final} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \quad (6)$$

#### 4.6.3.2. Análise de dados

Os dados de umidade de equilíbrio *versus* atividade de água foram usados para ajustar o modelo de sorção à equação matemática Equação (3), proposta por Guggenheim, Anderson e de Bôer (GAB), que apresenta um bom ajuste para uma ampla faixa de atividades de água. Os parâmetros do modelo foram determinados no software STATISTICA 7 usando o método de ajuste não linear por meio do algoritmo de Gauss-Newton.

Com base na curva plotada com pontos experimentais de umidade, foi admitido um valor inicial para  $X_m$ , para que fosse possível ajustar a isoterma de sorção para o óleo de abacate microencapsulado e obter um valor de  $X_m$  otimizado. Com base na curva de isoterma ajustada, é possível escolher uma condição de umidade relativa do ar, adequada para manter a sua qualidade durante o período de estocagem. A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Para a análise, primeiramente foi determinada a umidade na monocamada, com a construção de uma curva de umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) *versus* atividade de água ( $a_w$ ) com os dados coletados dos experimentos. Localizou-se o último ponto da umidade de equilíbrio antes da mudança na inclinação dos pontos. Este valor corresponde à umidade na monocamada ( $X_m$ ), que foi utilizado como parâmetro de entrada na equação do modelo de GAB (Equação 3), ajustada aos dados experimentais de atividade de água e umidade de equilíbrio por meio do software STATISTICA 7. O valor de  $X_m$  foi gradualmente ajustado para aproximar o coeficiente de determinação à unidade (valor desejável), melhorando, assim, o ajuste do modelo aos dados experimentais. No Software, os dados experimentais foram ajustados pelo modelo de GAB, seguindo as seleções indicadas no esquema ilustrado na Figura 17.

**Figura 17 – Esquema ilustrativo das seleções utilizadas para a análise de dados.**



Fonte: Elaboração própria.

Com isso, inseriu-se a equação de GAB com o  $X_m$  escolhido previamente para obtenção da isoterma e dos parâmetros estimados, para que fossem avaliados e ajustados até que um valor de  $X_m$  otimizado fosse alcançado.

#### 4.6.2. Análise MEV

A análise da microestrutura das micropartículas obtidas por spray drying foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). A técnica consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície de amostras sólidas, ponto a ponto. Como resultado da interação do feixe de elétrons incidentes com a amostra, há emissão de elétrons secundários e retroespalhados, que variam de acordo com a superfície. Tais elétrons são detectados e convertidos em um sinal de vídeo, obtendo-se assim imagens que contêm informações acerca da topografia e variação de composição química entre regiões de uma amostra. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica analítica que permite a obtenção de imagens em alta resolução com base em topografia ou diferenças de

composição química entre regiões de uma mesma amostra. As análises foram realizadas em um microscópio eletrônico de bancada modelo TM3030 Plus (Hitachi). Uma pequena amostra do produto microencapsulado é disposta sobre uma fita dupla-face condutora, retirando o excesso de pó, e a ampliação é ajustada até que seja possível a visualização da morfologia.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. PRÉ-TRATAMENTO DOS FRUTOS

Após a realização do pré-tratamento em autoclave, foram obtidos 5,24 kg de massa final, o que representa uma perda de aproximadamente 3% na etapa de inativação. Esta perda se deve, provavelmente, ao processo conduzido a 125 °C. Como esperado, ocorreu uma pequena perda de água contida na amostra, por evaporação. Na Tabela 7 estão apresentados os dados de balanço de massa do processo.

**Tabela 7 - Distribuição das massas do fruto após pré-tratamento.**

Parte do fruto	Massa (kg)	% da amostra <i>in natura</i>
Polpa + casca	4,34	82,7%
Semente	0,90	17,3%
Total	5,24	100,0%

Fonte: Elaboração própria.

## 5.2. SECAGEM

O aspecto visual da polpa após a secagem pode ser observado na Figura 18. A cor verde escura se deve à ação das enzimas endógenas do fruto (peroxidases) durante o processo.

**Figura 18 - Aspecto da polpa de abacate após o processo de secagem.**



Fonte: Elaboração própria.

### 5.2.1 Cinética de secagem

As massas das amostras obtidas após secagem da polpa de abacate estão apresentadas na Tabela 8. A massa seca, média das 5 amostras, determinada em balança de infravermelho foi  $1,19 \text{ g} \pm 0,014 \text{ g}$ .

**Tabela 8 - Dados brutos da análise da secagem das amostras.**

Amostra	Massa inicial (g)	Variação da massa das amostras ao longo do tempo de secagem (g)						
		15 min	30 min	45 min	60 min	75 min	90 min	24h
1	3,04	2,50	2,21	2,03	1,90	1,80	1,73	1,20
2	3,00	2,42	2,09	1,87	1,72	1,61	1,53	1,17
3	3,09	2,49	2,16	1,93	1,78	1,67	1,59	1,21
4	2,99	2,39	2,11	1,90	1,76	1,65	1,58	1,18
5	3,06	2,60	2,34	2,14	2,00	1,88	1,80	1,19

Fonte: Elaboração própria.

A umidade em base seca ( $X_{bs}$ ) e a umidade adimensional ( $U$ ) em função do tempo, calculadas pelas Equações (6a) e (6b), estão apresentadas na Tabela 9.

$$X_{bs} = \frac{m(t) - m_{seca}}{m_{seca}} \quad (6a)$$

$$U = \frac{X_t - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (6b)$$

onde:

$X_i$  – umidade inicial em base seca

$X_{eq}$  – umidade de equilíbrio em base seca

$X_t$  – umidade do ponto posterior

$m(t)$  – massa da amostra em função do tempo

**Tabela 9 - Dados da cinética de secagem**

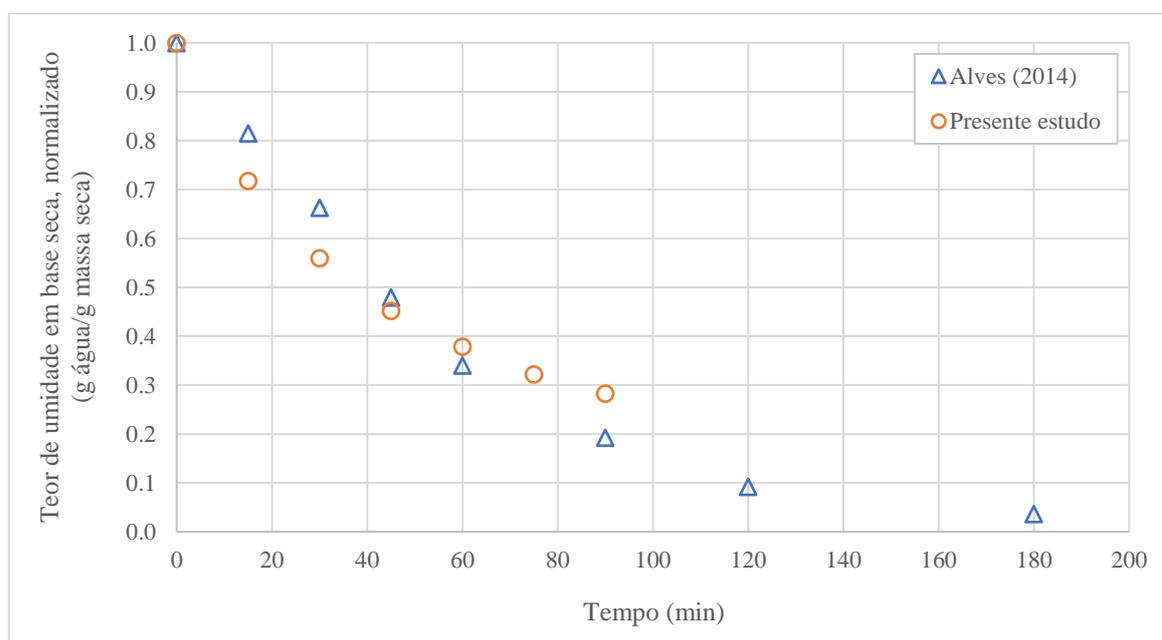
Tempo (min)	$X_{bs}^*$	$U^*$
0	1.77	1.00
15	1.27	0.70
30	0.99	0.54
45	0.80	0.42
60	0.67	0.34
75	0.57	0.28
90	0.50	0.24

Umidade de equilíbrio = 0,09; \*Média de 5 ensaios

Fonte: Elaboração própria.

A curva cinética obtida está ilustrada na Figura 19. No estudo de Alves (2014), que avaliou a secagem da polpa de abacate em diferentes temperaturas, o perfil foi similar ao encontrado para o experimento conduzido no presente estudo, a 50 °C durante três horas.

**Figura 19 – Cinética de secagem à 50°C, dados experimentais não linearizados e dados experimentais de Alves (2014).**



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar na Figura 19 que a perda de água até os 45 minutos apresenta, em ambos os casos, um comportamento linear. Nesse intervalo, que corresponde ao período de taxa constante, a maior taxa de secagem se deve ao processo de transporta de massa convectivo. Pode-se observar, adicionalmente, os valores de umidade crítica em base seca foram muito

próximos (0,34 e 0,38) para os dois casos analisados. A partir de 60 minutos o fenômeno difusivo controla o processo de secagem, dando início ao período de taxa decrescente. Nesta etapa, a maior parte da água livre está presente no interior da amostra. Ao longo do processo, praticamente toda a água livre é evaporada e a amostra atinge a umidade de equilíbrio. No estudo de Alves, a umidade de equilíbrio em base seca foi cerca de 0,037, bem inferior ao resultado estimado pelo modelo ajustado pela lei de Fick aos dados experimentais obtidos no presente estudo. Isto ocorre, provavelmente, devido à etapa de autoclavagem da polpa de abacate. A perda brusca de água a 115 °C pode ter modificado a estrutura da parede celular, reduzindo a porosidade da amostra.

Sabe-se que a secagem é um processo que envolve transferência de calor e massa simultaneamente entre o produto e o ar. Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um produto consideram como mecanismo principal a difusão, baseada na lei de Fick (GEANKOPLIS, 2003). Esse modelo é amplamente utilizado na literatura para secagem de produtos biológicos. Além dele, também foi utilizado o modelo empírico de Page (ALVES, 2010), que apresenta uma relação direta entre o teor médio de umidade e o tempo de secagem. A capacidade de predição desses modelos foi avaliada pela comparação entre a curva ajustada aos dados experimentais e aos dados estimados pelos modelos. A avaliação dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) é outra forma de validação dos modelos empregados: quanto mais próximo de 1, melhor a curva se ajusta aos pontos experimentais.

Os parâmetros dos modelos de Page e Fick foram determinados ajustando-se os dados às Equações (7a) e (7b), respectivamente.

$$U = \text{Exp}(-kt^n) \quad (7a)$$

$$U = K_1 * e^{-K_2*t} \quad (7b)$$

onde:

$$K_1 = \frac{8}{\pi^2}$$

$$K_2 = \frac{\pi^2}{4*L^2} * D_{\text{eff}}$$

L - semi-espessura da amostra (1,0 mm)

$D_{\text{eff}}$  - coeficiente de difusão efetivo ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

Os parâmetros obtidos para cada modelo estão apresentados na Tabela 10. Além disso, os dados experimentais e aqueles estimados pelos modelos foram ilustrados na Figura 20. Pode-

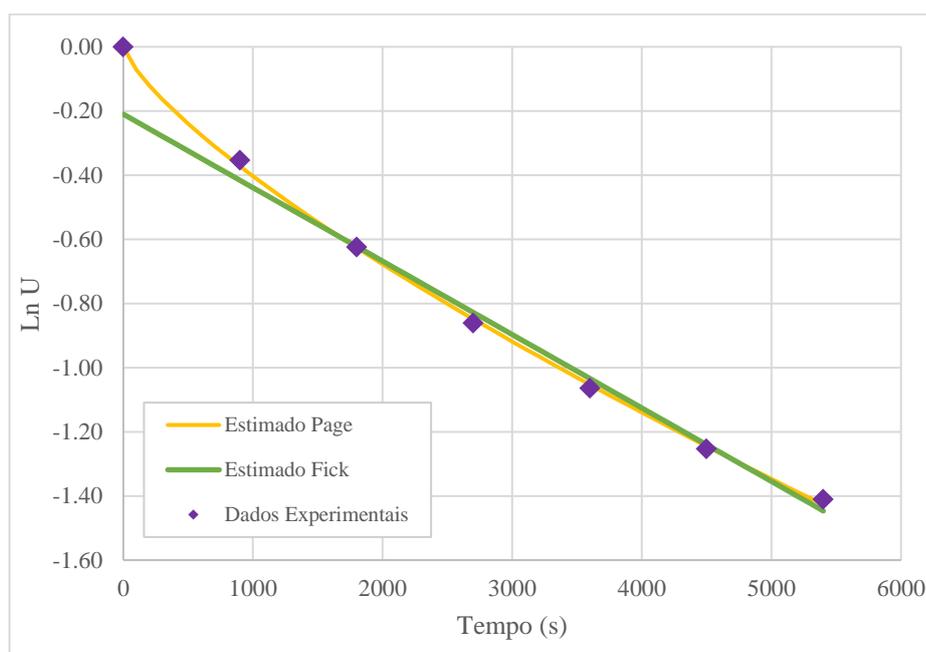
se observar tanto gráficamente como pela comparação entre os coeficientes de regressão ( $R^2$ ) que o modelo de Page é o que melhor se ajusta aos valores experimentais.

**Tabela 10 – Parâmetros dos modelos ajustados.**

Parâmetros do modelo de Page			Parâmetros do modelo de Fick		
k	n	$R^2$	$K_1$	$K_2$	$R^2$
$2,263 \cdot 10^{-3}$	0,750	0,999	-0,210	$2,229 \cdot 10^{-4}$	0,983

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 20 - Cinética de secagem à 50 °C, dados experimentais e estimados pelo modelo de Page e Fick.**



Fonte: Elaboração própria.

### 5.2.2 Teor de lipídios

O teor de lipídios na polpa de abacate Hass, determinado em aparelho Soxhlet, usando-se hexano como solvente foi de  $(63,5 \pm 0,5\%)$ . O valor encontrado foi superior ao valor típico reportado na literatura, cerca de 50%, podendo variar com a época da colheita, bem como com o estado de maturação do fruto (SANTANA *et al.*, 2015; DREHER & DAVENPOR, 2013).

### 5.3 EXTRAÇÃO DO ÓLEO POR PRENSAGEM A FRIO

Na extração do óleo por prensagem a frio, foram utilizados cerca de 205 g de polpa previamente seca que resultaram em aproximadamente 110 g de óleo extraído, alcançando-se um rendimento de 54 %, calculado segundo a Equação (8). Este valor foi superior aos reportados na literatura, entre 25 e 33% (XIAOLI e ZHONG, 2016; DOS SANTOS *et al.*, 2014). As diferenças observadas se devem, principalmente, ao estado de maturação do fruto. Sabe-se que quanto mais maduro o fruto maior é o teor de óleo na polpa (SANTANA *et al.*, 2015). Entretanto, Moreno e colaboradores (2003) encontraram um rendimento de aproximadamente 65% quando a polpa foi submetida a um pré tratamento com microondas, antes da extração por prensagem a frio.

$$\text{Rendimento}(\%) = \frac{\text{Massa de óleo (g)}}{\text{Massa de Amostra (g)}} \times 100 \quad (8)$$

O cálculo da eficiência de extração pelo método de prensagem, foi feito com base na Equação (9), e o valor obtido foi cerca de 85%. Este resultado foi superior aos valores reportados na literatura, indicando que a etapa de autoclavagem da polpa contribuiu para a ruptura da parede celular que protege o óleo.

$$\text{Eficiência de extração (\%)} = \frac{\text{Massa de óleo lipídeos (g)}}{\text{Massa de óleo na amostra (g)} * \text{rendimento}} \quad (9)$$

Como avaliado no estudo de Dos Santos e colaboradores (2014), a extração por prensagem a frio apresentou um rendimento menor de óleo, porém com maiores concentrações de  $\alpha$ -tocoferol, e menor conteúdo de campesterol e acetato de cicloartenol do que a extração de Soxhlet. O rendimento máximo do óleo foi obtido, dentre os métodos de extração avaliado pelos autores, pelo método de liofilização e extração de Soxhlet. Entretanto, a liofilização e a prensagem a frio foram os que forneceram óleos com maiores concentrações de compostos bioativos.

### 5.3. CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO EXTRAÍDO

Os índices de acidez e peróxido são definidos pela legislação brasileira (ANVISA, 2021) como parâmetros de qualidade, pois quanto menores os índices de acidez e peróxido, o óleo será menos suscetível à oxidação lipídica, processo que resulta na formação de compostos de degradação. Estas análises foram conduzidas em triplicata.

#### 5.3.1 Índice de Peróxido

O teor de peróxido avalia o nível de oxidação do óleo no óleo de abacate. Este valor foi abaixo do limite de detecção do método indicando que o óleo foi preservado em todas as etapas do processo: pré-tratamento por autoclavagem, secagem e extração mecânica a frio.

Na literatura, Santana e colaboradores (2015) encontraram índice de peróxido para o óleo obtido por prensagem a frio e secagem por microondas de 4,79 mEq/kg, valor inferior ao recomendado pela ANVISA (2021) que estabelece para óleos refinados valor máximo de 10 mEq/kg e para óleos prensados a frio e não refinados, de até 15 mEq/kg. No caso da prensagem a quente, Guillen-Sanchez e Paucar-Menacho (2020) reportaram valor de 19,18 mEq/kg, superior ao recomendado e, portanto, não apropriado para consumo humano, o que requer uma etapa de refino. Os autores atribuíram o resultado encontrado ao alto grau de insaturação que o óleo de abacate apresenta, o que influencia na velocidade de oxidação já que os ácidos graxos insaturados quando estão livres são oxidados, de maneira geral, mais rapidamente se comparados aos ácidos graxos saturados.

#### 5.3.2 Índice de acidez

O cálculo do índice de acidez (IA) é expresso em termos de mg de hidróxido de potássio utilizados para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em 1g de amostra, conforme a Equação (10).

$$IA \left( \frac{mg \text{ de } KOH}{g} \right) = \frac{(V - B) \times f \times PM}{Ma} \quad (10)$$

onde:

V= volume de NaOH 0,04N consumido na neutralização da amostra (mL)

B = volume de NaOH 0,04N consumido na neutralização do branco (mL)

f = fator de correção da solução de NaOH (1,02)

Ma = massa de amostra (g)

PM = peso molecular de KOH (56,1 g/mol)

O índice médio de acidez encontrado foi de  $3,72 \pm 0,32$  mg de KOH/g de óleo. Este valor está dentro das normas estabelecidas pela legislação brasileira, tendo em vista que para óleos prensados a frio e não refinados a RDC 270 estipula acidez máxima de 4,0 mg KOH/g. Na literatura foram reportados diferentes valores de índice acidez para óleo de abacate. Schaun *et al.* (2015) reportaram  $1,21 \pm 0,01$  g de ácido oleico/100g de óleo, para óleo de abacate Hass extraído da polpa por centrifugação. Já Fernandes e colaboradores (2015) realizaram a análise para óleo de abacate comestível comercial e obtiveram 2,66 g de ácido oleico/100g de óleo. Na Tabela 11, os índices de acidez foram convertidos para mesma unidade para efeitos de comparação, reunindo os resultados reportados na literatura como também a recomendação da ANVISA, através da Instrução normativa 87 de 2021. Tofanini (2004) investigou diversos parâmetros de qualidade de óleos vegetais e concluiu que óleos refinados e utilizados comercialmente apresentaram índice de acidez acima da recomendação da ANVISA.

**Tabela 11 – Índice de acidez para óleos de abacate reportados na literatura e recomendação da ANVISA.**

Óleo de abacate	IA(g de ácido oleico/100g de óleo)
Presente trabalho	$1,87 \pm 0,32$
Schaun <i>et al.</i> (2015)	$1,21 \pm 0,01$
Fernandes <i>et al.</i> (2015)	2,66
Recomendação da ANVISA	2,01

Fonte: elaboração própria

#### 5.4. OPERAÇÃO DO SPRAY DYER

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os valores obtidos de umidade do pó e eficiência do processo de secagem conduzidos nos ensaios 1 e 2. A eficiência foi calculada pela razão entre a vazão de água na alimentação e a vazão de água evaporada

**Tabela 12 – Resultados experimentais de umidade para os ensaios 1 e 2**

Ensaio	Umidade 1 (%)	Umidade 2 (%)	Umidade 3 (%)	Umidade média (%)	Desvio padrão
1	5,59	4,85	5,21	5,22	0,30
2	5,17	5,84	4,45	5,15	0,57

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 13 – Resultados experimentais de eficiência para os ensaios 1 e 2**

Ensaio	Temperatura (°C)	Vazão mássica de Ar (m <sup>3</sup> /h)	Vazão da emulsão (g/h)	Vazão de água na emulsão (mL/h)	Vazão de água evaporada (mL/h)	Eficiência da secagem (%)	Umidade média (%)
1	190	24,74	485	363,75	345,56	94,8%	5,22
2	190	21,74	485	363,75	345,02	94,9%	5,15

Fonte: Elaboração própria.

Ambas as condições apresentaram eficiências de secagem muito próximas. No caso do ensaio 2, descrito na Tabela 5, era esperado que com a diminuição da vazão de ar houvesse um aumento da eficiência do processo, já que houve um aumento no tempo de residência das gotículas/partículas na câmara de secagem, o que contribui para uma secagem mais efetiva. No caso do presente trabalho, a eficiência não é alterada significativamente pois a 190 °C a secagem das gotículas ocorre quase instantaneamente e, portanto, o efeito do tempo de residência foi significativo. Vale ressaltar que, o ensaio foi realizado previamente com a temperatura de 170 °C porém houve uma grande perda de massa de produto nas paredes do equipamento, o que reduz a quantidade obtida de produto em pó. Esse mesmo efeito foi reportado por Maia (2021), para temperaturas de entrada de ar menores. A quantidade final de produto é um parâmetro

importante a ser avaliado nessa operação, caso seja de interesse ampliar a escala de produção a nível industrial. Os valores de umidade obtidos nas micropartículas são próximos ao limite inferior dos resultados reportados na literatura (entre 3 e 17%) sendo recomendado o máximo de 8% (SILVA JAMES *et al.*, 2019; MAIA, 2021).

Além disso, foi possível calcular o calor perdido na parede da câmara de secagem a partir do balanço de energia descrito na Equação (5) e detalhado no Apêndice A. Esse cálculo é importante pois pode-se realizar a otimização do processo para que haja a minimização de energia perdida, ampliando a sustentabilidade do processo. Para o ensaio 1 foi obtido cerca de 1350 kJ/h de perda de calor. Além disso, outro parâmetro importante a ser avaliado é a perda de calor por metro quadrado de parede, no qual foi obtido cerca de 4.396 kJ/(h.m<sup>2</sup>). Estes dados são úteis quando se deseja conduzir um estudo de ampliação de escala desse processo. Na Tabela 14 estão dispostos, além das condições operacionais e resultados do presente trabalho, os dados de Dresch (2022) que avaliou o mesmo processo de microencapsulamento a partir do óleo de Tucumã.

**Tabela 14 – Comparação dados experimentais e dados de Dresch (2022).**

Parâmetros Operacionais	Presente Trabalho	Dresch (2022)
G	24,74 m <sup>3</sup> /h	19,09 m <sup>3</sup> /h
T <sub>ar,ent</sub>	190 °C	170 °C
T <sub>ar,sai</sub>	94 °C	71,4 °C
m <sub>em</sub> .	485 g/h	485 g/h
Calor perdido	1.349,6 kJ/h	525,9 kJ/h
Calor perdido por m <sup>2</sup>	4.396,2 kJ/(h.m <sup>2</sup> )	1.712,96 kJ/(h.m <sup>2</sup> )

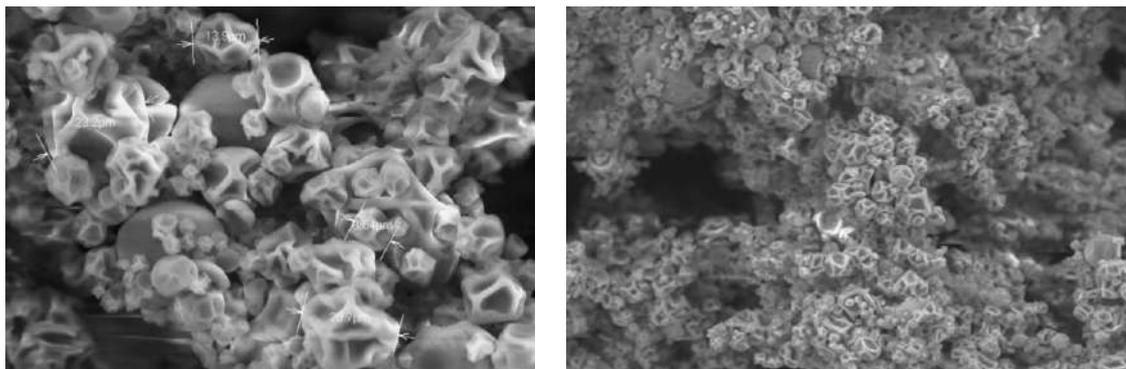
Fonte: Elaboração própria com dados de DRESCH (2022).

## 5.5. MICROENCAPSULAMENTO DO ÓLEO POR SPRAY DRYING

### 5.5.1 Caracterização do microencapsulado

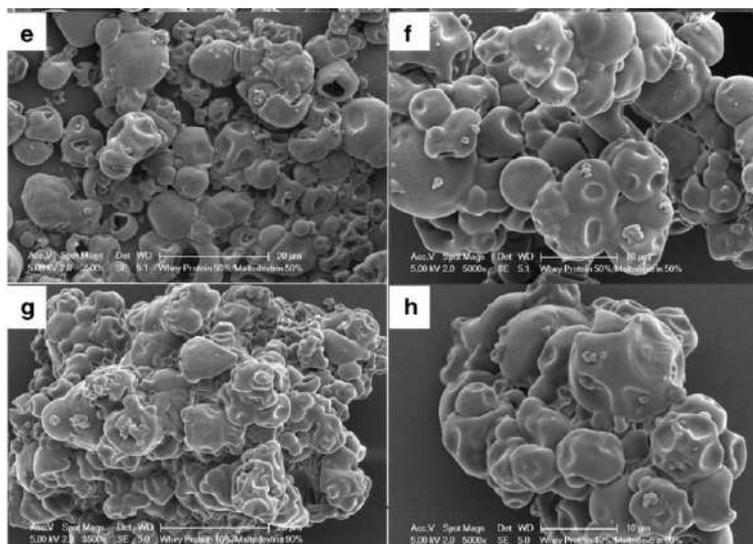
A microestrutura das partículas de óleo de abacate microencapsulado foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nesse estudo foi possível avaliar a granulometria, a morfologia das micropartículas geradas e a eficiência do encapsulamento. Pela Figura 21, pode-se observar o aspecto das micropartículas produzidas no ensaio 1. As mesmas apresentaram diversos diâmetros, variando entre 5-25  $\mu\text{m}$ , e morfologia irregular devido a presença de cavidades, sendo similares entre si. Não foram observadas fissuras na superfície das partículas. Esse mesmo aspecto foi encontrado por Bae e Lee (2008), onde os autores avaliaram diferentes composições de *whey protein* e maltodextrina como materiais de parede para o microencapsulamento do óleo de abacate por *spray drying*. No estudo, os autores obtiveram partículas menores, que variaram entre 1-10  $\mu\text{m}$ . Além disso, reportaram também a presença de irregularidades com depressões na superfície do microencapsulado, principalmente nas amostras que tinham uma composição maior de maltodextrina. Na Figura 22, estão dispostas as micrografias eletrônicas das amostras obtidas pelos autores com 50% ou mais de maltodextrina na composição do material de parede.

**Figura 21 – Micrografias eletrônicas das micropartículas obtidas no ensaio 1.**



À esquerda, aumento 1500x e à direita, aumento 500x. Fonte: Elaboração própria.

**Figura 22 - Micrografias eletrônicas do óleo de abacate microencapsulado.**



(e) e (f) com 50% de maltodextrina e 50% de *whey protein*; (g) e (h) com 90% de maltodextrina e 10% de *whey protein*; (e) e (g) aumento de 3500x; (f) e (h) aumento de 5000x. Fonte: BAE e LEE (2008).

#### 5.5.1.1 Estabilidade Oxidativa

Na análise de estabilidade oxidativa é possível avaliar a oxidação da amostra por meio de uma curva de aumento da condutividade dada pelo equipamento Rancimat, que fornece o tempo de indução da amostra. A estabilidade oxidativa, tanto do óleo bruto, como dos produtos microencapsulados foram avaliados em duplicata e os resultados de tempo de indução estão dispostos na Tabela 15.

**Tabela 15 - Dados experimentais obtidos para estabilidade oxidativa das amostras.**

Amostra	Tempo de indução	
	1 <sup>a</sup> réplica	2 <sup>a</sup> réplica
Óleo de abacate	36,78	36,84
Microencapsulado <sup>1</sup> - Ensaio 1	12,47	11,61
Microencapsulado <sup>2</sup> - Ensaio 2	20,75	20,30

<sup>1</sup> – Ensaio 1: Capsul antigo; <sup>2</sup> – Ensaio 2: Capsul novo lote

Fonte: Elaboração própria.

Primeiramente, pode-se observar que o óleo de abacate puro apresentou um tempo de indução maior, se comparado aos dados da literatura. No estudo de Santana e colaboradores.

(2014) os autores avaliaram a estabilidade do óleo de abacate bruto extraído pela combinação da etapa de secagem da polpa por micro-ondas e prensagem do óleo a frio, e encontraram um tempo de indução de  $20,80 \pm 1,63$  h. Por sua vez, Aktar e Adal (2019) encontraram  $7,06 \pm 3,15$  h para o óleo extraído por centrifugação. Ou seja, o óleo de abacate extraído no presente trabalho levou mais tempo até o início de sua oxidação, apresentando maior estabilidade que os dados já reportados pelos autores citados.

Pode-se observar que os microencapsulados apresentaram tempos de indução menores que o óleo de abacate bruto, ou seja, a oxidação das micropartículas se dá em menos tempo se comparado ao óleo bruto. Geranpour *et al.* (2020) observaram esse mesmo comportamento, que pode estar relacionado com a elevada área superficial do óleo microencapsulado, se comparado com o óleo bruto. Além disso, a secagem por spray dryer pode ser responsável pela menor estabilidade do pó pela utilização da alta temperatura (190°C).

A diferença de tempo de indução observados entre os ensaios 1 e 2 se deve, provavelmente, ao tempo de armazenamento do material de parede. No ensaio 1, o material de parede utilizado era mais antigo o que pode ter promovido uma menor resistência à oxidação do material. No segundo ensaio utilizou-se um novo lote de Capsul, o que promoveu um melhor resultado para estabilidade oxidativa das micropartículas. Conclusões mais robustas podem ser futuramente avaliadas, determinando-se a estabilidade oxidativa do material de parede puro.

O tempo de indução de 20 h para o óleo microencapsulado foi considerado satisfatório, uma vez que a temperatura utilizada para a operação do spray dryer, de 190 °C, é alta se comparada a outros estudos reportados na literatura. No entanto, como já mencionado anteriormente, esta temperatura foi a que resultou em um maior rendimento de produto microencapsulado e maior eficiência de secagem.

Apesar do tempo de indução ter sido menor que a do óleo bruto, o microencapsulamento foi empregado com a finalidade de aumentar a vida de prateleira do óleo e também pela facilidade de aplicação do produto na forma de pó em particular na formulação de produtos de aplicação tópica para a indústria de cosméticos. Conclusões mais assertivas acerca do microencapsulamento podem ser obtidas por meio de um estudo de vida de prateleira, expondo as micropartículas e o óleo bruto às mesmas condições, durante um mesmo período.

## 5.5.1.2 Isotermas de sorção

A partir dos dados de umidade das micropartículas em função da atividade de água, obtidos em triplicatas, foram calculados para cada condição os valores médios da umidade de equilíbrio das amostras após uma semana, os dados encontrados estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Massas das amostras e umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) após uma semana mantidas em dessecadores contendo diferentes soluções salinas supersaturadas.**

	$A_w$	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa de água (g)	Massa seca (g)	$X_{eq}$	Umidade	Umidade média	Desvio Padrão
LiCl	0,093	1,3270	1,0269	0,0835	0,9434	0,0885	8,13%	8,13%	$1,21 \times 10^{-3}$
		1,3121	1,0128	0,0811	0,9317	0,0870	8,00%		
		1,3152	1,0339	0,0853	0,9486	0,0899	8,25%		
MgCl <sub>2</sub>	0,327	1,3584	1,0565	0,0988	0,9577	0,1031	9,35%	8,97%	$3,26 \times 10^{-3}$
		1,3045	1,0269	0,0902	0,9367	0,0963	8,78%		
		1,3723	1,0799	0,0948	0,9851	0,0963	8,78%		
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,438	1,3183	1,0348	0,0913	0,9435	0,0968	8,82%	8,62%	$1,77 \times 10^{-3}$
		1,4646	1,1654	0,1020	1,0634	0,0959	8,75%		
		1,3609	1,0436	0,0886	0,9550	0,0927	8,49%		
NaCl	0,753	1,5430	1,2378	0,1375	1,1003	0,1249	11,11%	11,06%	$5,57 \times 10^{-4}$
		1,5045	1,1981	0,1318	1,0663	0,1236	11,00%		
		1,3270	1,0511	0,1163	0,9348	0,1245	11,07%		
BaCl <sub>2</sub>	0,903	1,5394	1,2340	0,2072	1,0268	0,2018	16,79%	16,80%	$8,60 \times 10^{-5}$
		1,5732	1,2724	0,2137	1,0587	0,2018	16,79%		
		1,5218	1,2198	0,2050	1,0148	0,2020	16,80%		
H <sub>2</sub> O	1	1,8856	1,5846	0,6039	0,9807	0,6157	38,11%	37,97%	$2,53 \times 10^{-3}$
		1,8322	1,5468	0,5829	0,9639	0,6047	37,68%		
		2,0078	1,6991	0,6479	1,0512	0,6163	38,13%		

Fonte: Elaboração própria.

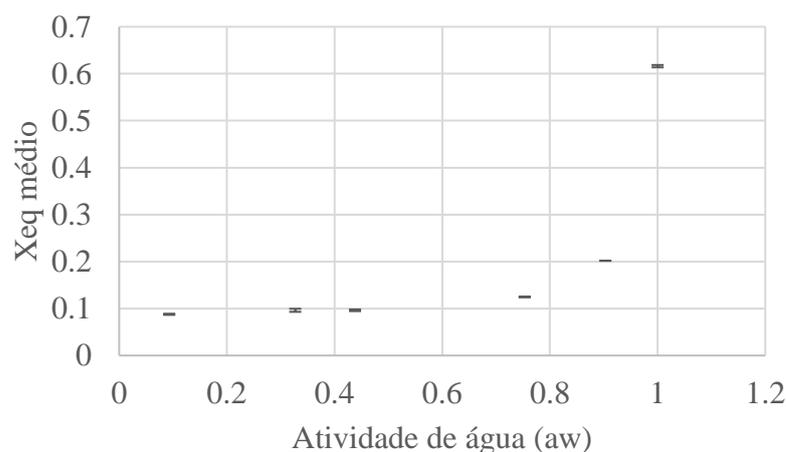
A partir da Figura 23, onde estão ilustrados os valores médios de umidade de equilíbrio em função da atividade de água, o ponto  $X_m = 0,096$ , foi selecionado para representar a umidade na monocamada. O teor de umidade da monocamada ( $X_m$ ) indica a quantidade de água fortemente ligada ao alimento e está diretamente relacionada com a higroscopicidade e hidrofiliçidade, características que auxiliam na análise da estabilidade físico-química dos

alimentos (SHRESTHA *et al.*, 2007). Esse ponto foi escolhido pois já no ponto subsequente é possível observar a umidade de equilíbrio cresce exponencialmente. Com esses valores, foi realizado um ajuste não-linear dos dados ao modelo de GAB, descrito pela Equação (3), para determinação dos parâmetros C e K. A Equação (7) descreve o modelo de GAB já considerando o valor da umidade da monocamada igual a 0,096. Na Figura 24, construída com base na curva obtida pelo software STATISTICA, está ilustrada a curva da isoterma de sorção para as micropartículas.

Com auxílio do software Statistica 7, para uma valor inicial de  $X_m$  igual a 0,096, os dados foram ajustados usando-se o algoritmo de Gauss-Newton para estimar os parâmetros C e K. A seguir, outros valores de  $X_m$  foram utilizados até se atingir o melhor ajuste ao modelo de GAB, sendo o ótimo, alcançado para  $X_m$  igual a 0.062 (Equação 7). Dresch (2022) encontrou valor de 0,1034 para  $X_m$ , no estudo de sorção para microencapsulamento do óleo de tucumã, também utilizando composição de material de parede similar ao presente trabalho. Porém o autor não realizou a análise para obtenção do  $X_m$  ótimo para o respectivo processo.

$$X_e = \frac{0,062 * C * K * a_w}{(1 - K * a_w)(1 - K * a_w + C * K * a_w)} \quad (7)$$

**Figura 23 - Gráfico de umidade de equilíbrio média ( $X_{eq}$ ) vs atividade de água ( $a_w$ ) das amostras.**

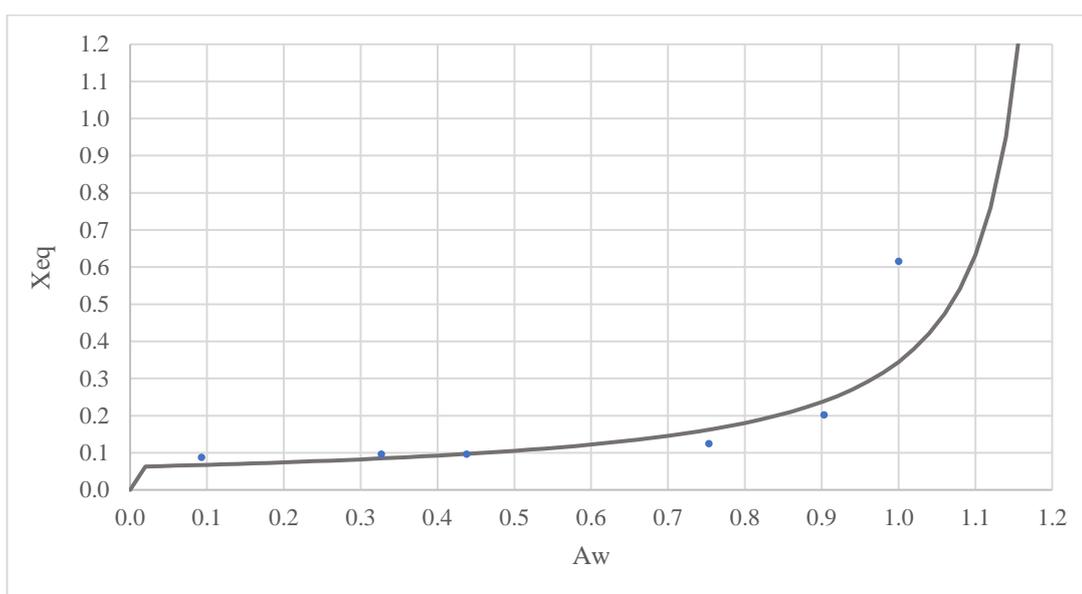


Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 17– Parâmetros de ajuste dos dados experimentais ao modelo GAB.**

Parâmetro	Valor
C	50158
K	0,820
R <sup>2</sup>	0,928
F	34,82

Fonte: Elaboração própria, dados obtidos do software STATISTICA.

**Figura 24 – Ajuste não-linear aos dados de umidade do equilíbrio e atividade de água.**

Fonte: Curva obtida com dados extraídos do software STATISTICA.

Pela Figura 24 é possível observar que trata-se de uma isoterma tipo 2 de acordo com a classificação de Brunauer indicando a presença de interações muito fracas em sistemas contendo macro e mesoporos. A isoterma apresenta perfil sigmoidal. Isothermas do tipo II são características de sistemas não porosos, esperado para o tipo de material de parede utilizado no estudo. O mesmo perfil foi observado por Frascareli e colaboradores (2012) onde os autores avaliaram o microencapsulamento do óleo de café utilizando goma arábica, whey protein e maltodextrina. O valor de R<sup>2</sup> está aquém do valor considerado ideal, porém foi o mais alto possível sem que comprometessem os outros parâmetros do modelo, como C e K. Os valores

de  $R^2$  superiores a 0,94 são considerados satisfatórios, de acordo com a literatura (KUTASSY, 2022). Pode-se observar que até o ponto 4, com atividade de água próxima a 0,8 não ocorre um crescimento expressivo no valor da umidade de equilíbrio da amostra.

No trabalho de Timmermann e colaboradores (2001) os autores analisaram as diferenças entre os modelos de BET e GAB no ajuste de dados experimentais aplicados em alimentos, concluindo-se que o modelo de GAB é o mais apropriado para descrever o comportamento de sorção de alimentos. O modelo incorpora vantagens importantes em relação ao modelo de BET, como representar adequadamente os dados experimentais na faixa de atividade de água de maior interesse prático em alimentos (0,10-0,90), enquanto BET é limitado a faixa de 0,3-0,4. Além disso, Guggenheim, Anderson and de Boer postularam que os estados das moléculas de água a partir da segunda camada em diante são semelhantes entre si, porém diferentes quando comparadas ao estado líquido. Com isso, os autores introduziram um parâmetro, chamado de K ou entalpia de sorção, a mais que BET, tornando o modelo mais versátil. O valor de K encontrado, 0,82, foi similar ao reportado por Dresch (2022), Bastioglu *et al.* (2017) e Adamiec (2009), que encontraram, 0,8; 0,8 e 1,0 respectivamente.

## 6. CONCLUSÕES

Dentre os modelos semi-empíricos avaliados na cinética de secagem, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. O processo de prensagem a frio da polpa do abacate Hass se mostrou mais eficiente do que dados já reportados na literatura.

O processo de microencapsulamento a 190 °C apresentou elevada eficiência (95%), o que resultou, como desejado, em um produto com baixa umidade e elevada estabilidade oxidativa. Entretanto, a estabilidade oxidativa das micropartículas foi inferior à do óleo bruto prensado a frio.

Pela curva de sorção, é indicado um limite máximo de umidade relativa do ar de aproximadamente 75%, para evitar degradação do pó microencapsulado durante seu armazenamento. O produto apresentou isoterma de sorção do Tipo II. Os resultados obtidos pela análise em MEV indicam que as condições de secagem por *spray dryer* deram origem a micropartículas com diâmetro entre 5 e 25 micrometros, sem fissuras.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito da aplicação de diferentes combinações de materiais de parede para o microencapsulamento, como a goma arábica, goma xantana, *whey protein*, que também possuem uma vasta aplicação na literatura para microencapsulamento de óleos vegetais
- Avaliar a estabilidade oxidativa do óleo bruto e das micropartículas durante o armazenamento por até 12 meses.
- Analisar a composição do óleo antes e depois do processo de microencapsulamento, para avaliar possíveis perdas de compostos de interesse.

## 8. REFERÊNCIAS

ADA. Position of the American Dietetic Association. **Journal of the American Dietetic Association**, v. 99, n. 10, p. 1278–1285, out. 1999.

ADAMIEC, J. Moisture Sorption Characteristics of Peppermint Oil Microencapsulated by Spray Drying. **Drying Technology**, v. 27, n. 12, p. 1363-1369, 2009.

AGUIAR, J.; ALBERTO, M.; LUCAS TORQUATO ESTRACINE. ANÁLISE DE MERCADO DO ÓLEO DE ABACATE. **Interface Tecnológica**, 30 jul. 2020.

AKTAR, T.; ADAL, E. Determining the Arrhenius Kinetics of Avocado Oil: Oxidative Stability under Rancimat Test Conditions. **Foods**, v. 8, n. 7, p. 236, 30 jun. 2019.

ALMEIDA, F. D. R. de. **Estabilidade Oxidativa da Oleína de Tucumã (*Astrocaryum vulgare Mart.*) Após Microencapsulamento por Spray Dryer**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

ALVES, S. B. **Estudo experimental da cinética de secagem do abacate (*Persea americana Mill.*)**. João Pessoa, 2010.

ANVISA. RDC No 481, de 15 de março de 2021 - “**Regulamento técnico para óleos vegetais e gorduras vegetais**” Brasil, 2021a.

AOCS. **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists’ Society**. 5th Edition, Champaign. 2004

ARAÚJO, R. G. et al. **Hydrothermal–Microwave Processing for Starch Extraction from Mexican Avocado Seeds: Operational Conditions and Characterization**. *Processes*, v. 8, n. 7, p. 759, 29 jun. 2020.

ARAÚJO, R. G. et al. Process optimization of microwave-assisted extraction of bioactive molecules from avocado seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 154, p. 112623, out. 2020.

ARAUJO, R. G. et al. Recovery of bioactive components from avocado peels using microwave-assisted extraction. **Food and Bioproducts Processing**, v. 127, p. 152–161, 1 maio 2021.

ARENAS-JAL, M.; SUÑÉ-NEGRE, J. M.; GARCÍA-MONTOYA, E. An overview of microencapsulation in the food industry: opportunities, challenges, and innovations. **European Food Research and Technology**, v. 246, n. 7, p. 1371–1382, 13 abr. 2020.

BAE, E. K.; LEE, S. J. Microencapsulation of avocado oil by spray drying using whey protein and maltodextrin. **Journal of Microencapsulation**, v. 25, n. 8, p. 549–560, 20 out. 2008.

BASTIÖĞLU, Asli Zongur; KOÇ, Mehmet; ERTEKIN, Figen Kaymak. Moisture sorption isotherm of microencapsulated extra virgin olive oil by spray drying. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 11, n. 3, p. 1295-1305, 2017.

BRAI, B. I. C.; ODETOLA, A. A.; AGOMO, P. U. Hypoglycemic and Hypocholesterolemic Potential of *Persea americana* Leaf Extracts. **Journal of Medicinal Food**, v. 10, n. 2, p. 356–360, jun. 2007.

BRUNAUER, S. et al. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. **Journal of the American Chemical Society**, v. 62, n. 7, p. 1723–1732, jul. 1940.

CAETANO, M. et al. **Secagem da casca de abacate (*Persea americana*) e a avaliação do comportamento do teor compostos bioativos. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia Química** 1 dez. 2014.

COLOMBO, R.; PAPETTI, A. Avocado ( *Persea americana* Mill.) by-products and their impact: from bioactive compounds to biomass energy and sorbent material for removing contaminants. A review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 54, n. 4, p. 943–951, mar. 2019.

DAIUTO, É. R. et al. Composição química e atividade antioxidante da polpa e resíduos de abacate “Hass”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 417–424, jun. 2014.

DEL CASTILLO-LLAMOSAS, A. et al. Hydrothermal treatment of avocado peel waste for the simultaneous recovery of oligosaccharides and antioxidant phenolics. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 125981, dez. 2021.

DEDAVID, B. et al. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDUPUCRS, 2007.

DONADIO, Luiz Carlos. Abacate para exportação: aspectos técnicos da produção. **Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural, SDR, Programa de Apoio à Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais**– FRUPEX, 1995.

DOS SANTOS, M. A. Z. et al. Profile of Bioactive Compounds in Avocado Pulp Oil: Influence of the Drying Processes and Extraction Methods. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 91, n. 1, p. 19–27, 19 nov. 2013.

DREHER, M. L.; DAVENPORT, A. J. Hass Avocado Composition and Potential Health Effects. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 53, n. 7, p. 738–750, jan. 2013.

FAO. Major Tropical Fruits Market Review – Preliminary results 2022. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome, 2023

FAO. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. Rome. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2022.

FERNANDES, A. M. et al. **Comparação das propriedades físico-químicas do óleo de abacate comestível com azeite de oliva extra virgem. Anais do Simpósio Latino Americano de Ciências de Alimentos**. 2015

FIGUEROA, J. G. et al. Functional ingredient from avocado peel: Microwave-assisted extraction, characterization and potential applications for the food industry. **Food Chemistry**, v. 352, p. 129300, ago. 2021.

FLORES, M. et al. Avocado Oil: Characteristics, Properties, and Applications. **Molecules**, v. 24, n. 11, p. 2172, 10 jun. 2019.

FORERO-DORIA, O. et al. Thermal analysis and antioxidant activity of oil extracted from pulp of ripe avocados. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 130, n. 2, p. 959–966, 5 jun. 2017.

Fruticultura Tropical - **Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/portfolio/fruticultura-tropical>>.

FRASCARELI, E.C., et al. (2012), Determination of critical storage conditions of coffee oil microcapsules by coupling water sorption isotherms and glass transition temperature. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, p. 1044-1054. 2012.

GERANPOUR, M.; ASSADPOUR, E.; JAFARI, S. M. Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils. **Trends in Food Science & Technology**, v. 102, p. 71–90, ago. 2020.

GHARSALLAOUI, A. et al. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. **Food Research International**, v. 40, n. 9, p. 1107–1121, nov. 2007.

Global Hass Avocado Market | 2022 - 27 | **Industry Share, Size, Growth - Mordor Intelligence**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-hass-avocado-market>>.

GUILLÉN-SÁNCHEZ, J.; PAUCAR-MENACHO, L. Oxidative stability and shelf life of avocado oil extracted cold and hot using discard avocado (*Persea americana*). **Scientia Agropecuaria**, v. 11, n. 1, p. 127–133, 31 mar. 2020.

GOLJA, B.; ŠUMIGA, B.; FORTE TAVČER, P. Fragrant finishing of cotton with microcapsules: comparison between printing and impregnation. **Coloration Technol**, 129: 338-346. 2013

KATIA, N. et al. Increasing energy efficiency in microencapsulation of soybean oil by spray drying. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8082–8095, 1 jan. 2019.

KIVEVELE, T.; HUAN, Z. Review of the stability of biodiesel produced from less common vegetable oils of African origin. **South African Journal of Science**, v. 111, n. 9/10, 25 set. 2015.

KUTASSY, A. R. L.. **Microencapsulação de fitoesterol associados a óleos essenciais por spray drying para aplicação em produtos funcionais**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.

LETRO, C. B. et al. Ômega-3 e doenças cardiovasculares: uma revisão à luz das atuais recomendações. **Revista Eletrônica Acervo Científico**, v. 26, p. e7398, 23 maio 2021.

MAIA, E. B. V.. **Microencapsulamento de óleos vegetais em Spray-Dryer: Modelagem E Simulação**. Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2023

MARTIN, C. A. et al. Ácidos graxos poliinsaturados ômega-3 e ômega-6: importância e ocorrência em alimentos. **Revista de Nutrição**, v. 19, n. 6, p. 761–770, dez. 2006.

MOREIRA, T. B. et al. Comportamento das isotermas de adsorção do pó da polpa de manga liofilizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1093–1098, out. 2013.

MORENO, A. O. et al. Effect of Different Extraction Methods on Fatty Acids, Volatile Compounds, and Physical and Chemical Properties of Avocado (*Persea americana Mill.*) Oil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 8, p. 2216–2221, abr. 2003.

NOGUEIRA-DE-ALMEIDA, C. A. et al. Perfil nutricional e benefícios do azeite de abacate (*Persea americana*): uma revisão integrativa. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, n. 0, 18 out. 2018.

OLIVEIRA, K. S.; BOJORGE, N.; SUELY PEREIRA FREITAS. Lipid microencapsulation process using spray drying: modeling and heat recovery study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 38, n. 4, p. 641–652, 3 nov. 2021.

PARK, K. J. B., PARK, K. J., CORNEJO, F. E. P. E FABBRO, I. M. D. "Considerações termodinâmicas das isotermas". **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais** 10.1, 2008

PEREIRA, K. C. et al. Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, n. 0, 14 jun. 2018.

PEREIRA, P. A. **Evolução da produção mundial e nacional de abacate 2015. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)**. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

Produção Agropecuária | **IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/abacate/br>>.

QIN, X.; ZHONG, J. A Review of Extraction Techniques for Avocado Oil. **Journal of Oleo Science**, v. 65, n. 11, p. 881–888, 2016.

RANADE, S., Thiagarajan, P. A review on *Persea Americana Mill.* (Avocado)- Its fruit and oil. **International Journal of PharmTech Research**, 8, 72-77. 2015

SAMPAIO, A.C., Whately, M.C. **Abacaticultura sustentável**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

SANTANA, I. et al. Avocado (*Persea americana Mill.*) oil produced by microwave drying and expeller pressing exhibits low acidity and high oxidative stability. **European Journal of Lipid Science and Technology**. v. 117, n. 7, p. 999–1007, 23 jan. 2015.

SANTOS, P. D. DE F. et al. Microencapsulation of carotenoid-rich materials: A review. **Food Research International**, v. 147, p. 110571, set. 2021.

SCHAUN, J. da S. et al. **Parâmetros de qualidade do óleo de abacate de diferentes variedades extraídos por centrifugação. In:XXIV Congresso de Iniciação Científica da universidade de pelotas.** 2015

SHRESTHA, A. K. et al. Water sorption and glass transition properties of spray dried lactose hydrolysed skim milk powder. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 1593–1600, nov. 2007.

SIHVONEN, M. Advances in supercritical carbon dioxide technologies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 10, n. 6-7, p. 217–222, jun. 1999.

SIMOPOULOS, A. An Increase in the Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio Increases the Risk for Obesity. **Nutrients**, v. 8, n. 3, p. 128, 2 mar. 2016.

SINGH, T. C.. **Avaliação Dos Parâmetros Físico-Químicos E Estabilidade De Compostos Bioativos Em Óleos De Polpa E Amêndoa De Frutos Amazônicos. Doutorado,** Universidade Estadual Paulista, 2015.

TAN, C. X.; TAN, S. S.; TAN, S. T. Influence of Geographical Origins on the Physicochemical Properties of Hass Avocado Oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 94, n. 12, p. 1431–1437, 5 set. 2017.

TANGO, J. S.; CARVALHO, C. R. L.; SOARES, N. B. Caracterização física e química de frutos de abacate visando a seu potencial para extração de óleo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 1, p. 17–23, abr. 2004.

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, 1 abr. 2001.

TOFANINI, A. J. **Controle de qualidade de óleos comestíveis.** Trabalho de conclusão de curso - Curso de Graduação em Química, Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

TRINDADE, C. S. F.; PINHO, S. C.; ROCHA, G. A. Review: microencapsulation of food ingredients. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 11, n. 2, p. 103-112, 2008.

UNLU, N. Z. et al. Carotenoid Absorption from Salad and Salsa by Humans Is Enhanced by the Addition of Avocado or Avocado Oil. **The Journal of Nutrition**, v. 135, n. 3, p. 431–436, 1 mar. 2005.

VEIGA, R. D. S. D. et al. Essential oils microencapsulated obtained by spray drying: a review. **Journal of Essential Oil Research**, v. 31, n. 6, p. 457–473, 20 maio 2019.

VITA DI STEFANO et al. Quantitative evaluation of the phenolic profile in fruits of six avocado (*Persea americana*) cultivars by ultra-high-performance liquid chromatography-heated electrospray-mass spectrometry. **International Journal of Food Properties**, v. 20, n. 6, p. 1302–1312, 28 set. 2016.

WOOLF, A. et al. Avocado Oil. **Gourmet and Health-Promoting Specialty Oils**, p. 73–125, 2009.

**World Avocado Map 2023: Global Growth Far From Over**. Disponível em: <<https://research.rabobank.com/far/en/sectors/fresh-produce/world-avocado-map-2023-global-growth-far-from-over.html>>.

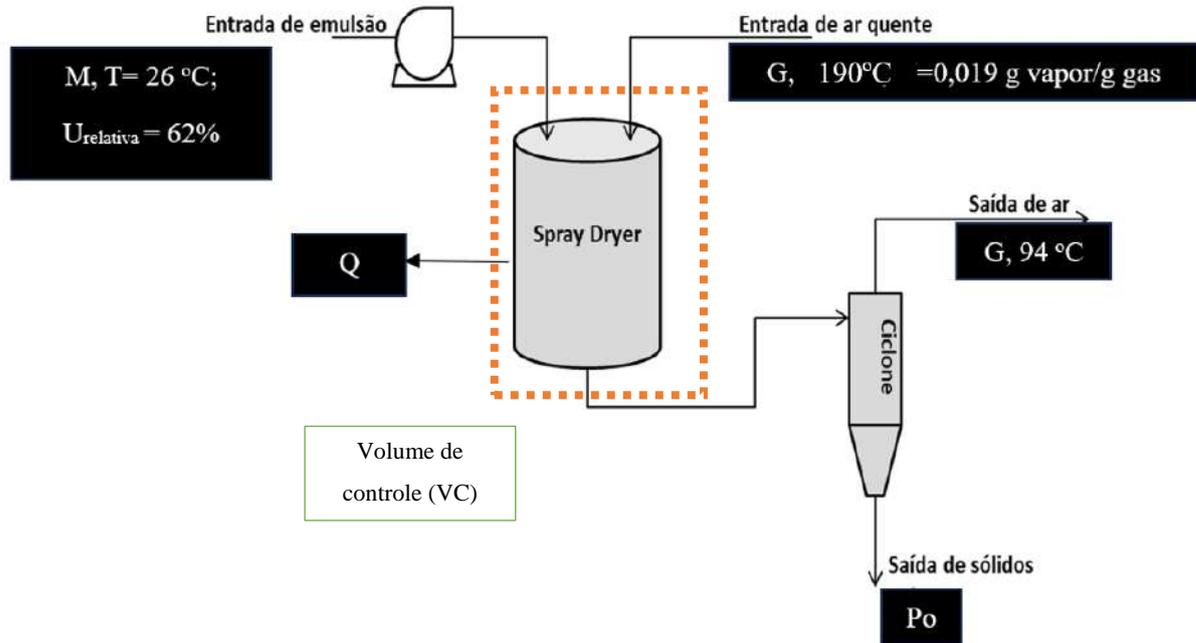
YANG, S. et al. Cellular Changes in “Hass” Avocado Mesocarp During Cold-Pressed Oil Extraction. **Journal of the American Oil Chemists’ Society**, v. 95, n. 2, p. 229–238, fev. 2018.

ZANIN, R. et. al. Modulation of aroma release of instant coffees through microparticles of roasted coffee oil. **Food Chemistry**, v. 341, parte 1. 2021.

ZEYMER, J. S. **Equilíbrio higroscópico e análise termodinâmica da sorção de água em grãos de arroz em casca**. Dissertação. 2017. UFV - Universidade Federal de Viçosa, 22 jul. 2017.

APÊNDICE A – Cálculo do calor perdido na câmara de secagem do spray dryer

**Figura 25 – Representação esquemática da operação do Spray Dryer.**



**Tabela 18 - Dados necessários para realização dos cálculos**

Dados do Ar		Dados da Emulsão	
G	24.74 m <sup>3</sup> /h	m <sub>emul.</sub>	485 g/h
T <sub>ar,ent</sub>	190 °C	Teor de sólidos	25%
T <sub>ar,sai</sub> = T <sub>ref</sub>	94 °C	Umidade do pó	5,22%
C <sub>par</sub>	0,2435 kcal/Kg°C	C <sub>pemul</sub>	0,9968 kcal/Kg°C

Fonte: Elaboração própria.

Onde:

G: vazão mássica de ar

T<sub>ar,ent</sub>: Temperatura do ar de entrada

T<sub>ar,sai</sub>: Temperatura de saída do Ar

T<sub>ref</sub>: Temperatura de referência

m<sub>emul.</sub>: Vazão mássica de emulsão

c<sub>pemul</sub>: capacidade calorífica da emulsão

c<sub>par</sub>: capacidade calorífica do ar (gás + vapor)

Antes da realização do balanço de energia, primeiramente foram calculados e convertidos os valores de alguns parâmetros.

- Conversão de unidade dos Cps:

$$Cp_{emul} = 0,9968 \frac{kcal}{Kg^{\circ}C} * 4,18 \frac{KJ}{Kcal} = 4,166624 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}$$

$$Cp_{ar} = 0,2435 \frac{kcal}{Kg^{\circ}C} * 4,18 \frac{KJ}{Kcal} = 1,01783 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}$$

- Vazão de água evaporada: da Tabela 13, temos 345,56mL/h. Convertendo para vazão mássica de água evaporada temos:

$$\dot{m}_{\text{água, evap}} = 345,56 \frac{mL}{h} * 0,001 \frac{Kg}{mL} = 0,34556 \frac{Kg}{h}$$

- A umidade absoluta do ar de entrada (U) foi determinada com posse dos dados da temperatura ambiente da sala (26°C), umidade relativa do dia que o experimento foi realizado (62%) e um gráfico com a curva psicométrica.

$$U = 19 \frac{g \text{ água}}{Kg \text{ de ar seco}} = 0,019 \frac{Kg \text{ água}}{Kg \text{ de ar seco}}$$

- As entalpias de vaporização ( $\lambda_{temp}$ ) para as diferentes temperaturas foram consultadas em tabela de propriedades da água, tem-se:

$$\lambda_{190} = 1978,76 \frac{KJ}{Kg}$$

$$\lambda_{94} = 2268,815 \frac{KJ}{Kg}$$

- O Cp do gás pode ser calculado com a seguinte relação:

$$Cp_{ar} = Cp_{gás} + U * Cp_{vapor}$$

$$1,01783 = Cp_{gás} + 0,019 * 4,18$$

$$Cp_{gás} = 0,93841 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}$$

Prosseguindo para o balanço de energia para o sistema foi calculado como descrito na Equação (5):

$$\sum_i^m \Delta H_{ent,i} - \sum_i^m \Delta H_{sai,i} - Q_{parede} = 0 \quad (5)$$

As correntes de entrada do processo são: o ar e a emulsão; As correntes de saída são: ar e produto seco. Logo, a Equação (5) pode ser reescrita como:

$$H_{ent,ar} + H_{ent,emul.} = H_{sai,ar} + Q_{parede} \quad (5a)$$

Entalpia da emulsão:

$$H_{ent,emul.} = \dot{m}_{emul.} * Cp_{emul.} * (T_{emul} - T_{ref})$$

$$H_{ent,emul.} = 0,485 * 4,166624 * (26 - 94)$$

$$H_{ent,emul.} = -137,39 \frac{KJ}{h}$$

Entalpia do ar na entrada: A temperatura de referência ( $T_{ref}$ ) foi definida como a temperatura de saída do ar. Para cálculo da entalpia do ar, foi considerada a simplificação no qual este se comporta como um gás ideal, ou seja:

$$G * H_{ent,ar} = G * H_{gás} + G * H_{vapor}$$

$$Gás: G * H_{gás} = G * Cp_{gás} * (T_{gás} - T_{ref}) \quad (5b)$$

$$Vapor: G * H_{vapor} = G * U [Cp_{vapor} * (T_{vapor} - T_{ref}) + \lambda_{170}] \quad (5c)$$

Fazendo (5b) em (5c) temos:

$$G * H_{ent,ar} = G \{ Cp_{gás} * (T_{gás} - T_{ref}) + U [Cp_{vapor} * (T_{vapor} - T_{ref}) + \lambda_{190}] \}$$

$$G * H_{ent,ar} = 24,74 \{ 0,93841 * (190 - 94) + 0,019 [4,18 * (190 - 94) + 1978,76] \}$$

$$G * H_{ent,ar} = 3347,52 \frac{KJ}{h}$$

Entalpia do ar na saída:

$$G * H_{sai,ar} = G * U_{saida} * \lambda_{94}$$

$$U_{saida} = \frac{U * G + \dot{m}_{água,evap.}}{G} = \frac{(0,019 * 24,74) + 0,34556}{24,74} = 0,03296 \frac{kgv \text{apor}}{kg \text{ ar seco}}$$

$$G * H_{sai,ar} = 24,74 * 0,03296 * 2268,815$$

$$G * H_{sai,ar} = 1850,49 \frac{KJ}{h}$$

Calor perdido na parede, pela Equação (5a):

$$3347,52 - 137,39 = 1860,49 + Q_{parede}$$

$$Q_{parede} = 1349,64 \frac{KJ}{h}$$

Também é possível calcular o calor perdido por m<sup>2</sup> da parede da câmara, em posse das dimensões altura (H=0,347m), diâmetro (D=0,215m) e aproximando por um cilindro perfeito:

$$A_{parede} = 2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0,307m^2$$

$$Q'_{parede} = \frac{Q_{parede}}{A_{parede}} = \frac{1349,64}{0,307} = 4396,23 \frac{KJ}{h * m^2}$$