



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Jonas da Silva

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MILHO VERDE EM PÓ POR
*CAST-TAPE DRYING***

Florianópolis
2021

Jonas da Silva

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MILHO VERDE EM PÓ POR
*CAST-TAPE DRYING***

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Coorientadores: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carcioffi
Dr. Ricardo Lemos Monteiro

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

da Silva, Jonas

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MILHO VERDE EM PÓ POR CAST
TAPE DRYING / Jonas da Silva ; orientador, João Borges
Laurindo, coorientador, Bruno Augusto Mattar Carcioffi ,
coorientador, Ricardo Lemos Monteiro, 2021.

92 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Milho doce . 3. Secagem.
4. Pós. 5. Refractance window. I. Laurindo, João Borges .
II. Carcioffi , Bruno Augusto Mattar . III. Monteiro,
Ricardo Lemos IV. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. V.
Título.

Jonas da Silva

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MILHO VERDE EM PÓ POR
*CAST-TAPE DRYING***

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. João Borges Laurindo
Presidente - UFSC

Dra. Jaqueline Oliveira de Moraes
Membro interno - UFSC

Prof. Dr. Giustino Tribuzi
Membro externo - UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos

Profa. Dra. Sandra Regina Salvador Ferreira
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. João Borges Laurindo
Orientador

Florianópolis, 2021

Este trabalho é dedicado a minha família e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde.

Aos meus pais João Neto Silva e Maria de Fátima Da Silva, as minhas irmãs Marília da Silva e Meriane da Silva, e ao meu irmão Jeunes da Silva. Minha caminhada foi possível graças ao esforço e apoio deles. Sou grato por ter acreditado em mim, e me guiar para o caminho certo. Não tenho palavras para descrever o amor que sinto por vocês.

Aos orientadores João Borges Laurindo, Bruno Augusto Mattar Carciofi e Ricardo Lemos Monteiro, pelos ensinamentos, pela contribuição na vida acadêmica e pessoal, e pela paciência durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos que fiz durante o período de mestrado, em especial a, Anderson Felipe, pela amizade e apoio tanto na vida pessoal quanto acadêmica.

Aos amigos do laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), pelos conhecimentos transmitidos e pelos momentos vividos.

Aos amigos que mesmo longe, demonstraram apoio na minha caminhada e contribuíram de alguma forma emocional para minha vida.

À banca examinadora pela disposição, correções e sugestões.

À CAPES pela concessão da bolsa e a oportunidade de estudo.

Por fim, a todas as pessoas que me incentivaram a crescer e a sempre buscar meus objetivos.

*Quando eu saí em direção ao
portão que me levaria à liberdade,
eu sabia que, se eu não deixasse minha
amargura e meu ódio para trás,
eu ainda estaria na prisão.*

Nelson Mandela

RESUMO

O milho verde é um cereal bastante utilizado na elaboração de pratos culinários tradicionais. A utilização de técnicas que diversifiquem suas formas de consumo, aumentem a sua vida útil e agreguem valor aos seus produtos podem gerar novas oportunidades para os produtores. Pré-tratamentos térmicos aplicados em alimentos que contêm amido podem ocasionar modificações em sua composição, interferindo no processo de retrogradação e melhorando a estabilidade e viscosidade do material após a secagem. A secagem por *cast-tape drying* (CTD) tem se mostrado um método alternativo para a produção de alimentos em pó que garantem a estabilidade dos produtos desidratados. Com isso, o objetivo desse estudo foi produzir milho verde em pó por CTD e avaliar a aplicação de um pré-tratamento térmico na matéria-prima e as características físico-químicas e reológicas do produto obtido. A secagem foi executada utilizando polpa de milho verde em conserva (PMV_0) e polpa de milho verde em conserva após o pré-tratamento térmico durante 15 min a 120 °C (PMV_1). As amostras foram espalhadas com 3 mm de espessura no secador CTD sobre um suporte de Teflon[®], usando o vapor como fonte de aquecimento (98 °C). Em seguida, foram avaliadas as curvas de secagem e a evolução da temperatura da polpa durante o processo, para dadas condições do ar de secagem em batelada e contínuo. Os pós produzidos por CTD contínuo foram caracterizados quanto às suas propriedades físico-químicas e avaliados quanto ao comportamento reológico após reidratação. O modelo de Midilli apresentou bom ajuste aos dados experimentais para as curvas de secagem, $R^2 > 0,98$. Em relação aos pós obtidos, o pré-tratamento térmico aplicado reduziu o tempo de dispersão e aumentou a solubilidade e a porosidade do leito fixo das amostras em pó. As pastas formadas a partir dos pós reconstituídos apresentaram comportamento pseudoplástico, característico de produtos à base de milho. Esses resultados mostram que o pré-tratamento térmico aplicado no milho verde e o processo de secagem CTD podem ser usados para a produção de milho verde desidratado, que pode ser reconstituído para uso em preparações culinárias tradicionais. Essa alternativa favorece o uso do milho verde, devido à conveniência do produto desidratado.

Palavras-chave: Milho doce; Secagem; Pós; *Refractance window*.

ABSTRACT

Sweet corn is a cereal widely used in the preparation of traditional culinary dishes. The use of techniques that diversify their forms of consumption, increase their useful life and add value to their products can generate new opportunities for producers. Heat pretreatments applied to foods that contain starch can cause changes in their composition, interfering with the retrogradation process and improving the stability and viscosity of the material after drying. Cast-tape drying (CTD) has been shown to be an alternative method for the production of powdered foods that guarantee the stability of dehydrated products. Thus, the objective of this study was to produce powdered sweet corn by CTD and to evaluate the application of a heat pretreatment in the raw material and the physical-chemical and rheological characteristics of the product obtained. The drying was carried out using canned sweet corn pulp (PMV_0) and canned sweet corn pulp after heat pretreatment for 15 min at 120 °C (PMV_1). The samples were spread with a thickness of 3 mm in the CTD dryer on a Teflon® support, using steam as a heating source (98 °C). Then, the drying curves and the temperature evolution of the pulp during the process were evaluated for the drying air conditions in batch and continuous processes. The powders produced by continuous CTD were characterized for their physical-chemical properties and evaluated for rheological behavior after rehydration. The Midilli model presented a good fit to the experimental data for the drying curves, $R^2 > 0.98$. Regarding to the powders obtained, the heat pretreatment applied reduced the dispersion time and increased the solubility and porosity of the fixed bed of the powder samples. The suspension obtained with the reconstituted powders showed a shear-thinning behavior, characteristic of corn-based products. These results show that the heat pretreatment applied to sweet corn using CTD can be used to produce dehydrated sweet corn, which can be reconstituted and applied as ingredient in different formulations. This alternative favors the use of sweet corn, due to the convenience of the dehydrated product.

Keywords: Sweet corn. Drying. Powder. *Refractance window*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da produção mundial de milho no ano de 2019.	23
Figura 2 - Curvas típicas de secagem.	28
Figura 3 - Esquema da secagem das suspensões por CTD.....	32
Figura 4 - Isoterma típica de sorção de umidade.....	36
Figura 5 - Tipos de isotermas de sorção.....	37
Figura 6 - Esquema demonstrativo da reidratação de pós em um líquido.....	38
Figura 7 - Fluxograma representativo das etapas do estudo.....	41
Figura 8 - Representação esquemática da avaliação da evolução da temperatura da amostra (PMV_1) durante o pré-tratamento térmico.	42
Figura 9 – a) Aparato experimental do CTDB; b) Equipamento CTDB utilizado.....	43
Figura 10 – a) Aparato experimental do CTDC; b) Equipamento CTDC utilizado.....	45
Figura 11 - Representação das regiões (1, 2 e 3) de coleta das amostras para obtenção das curvas de secagem em tempos pré-determinados em CTDB.....	46
Figura 12 - Representação das regiões (1, 2 e 3) de coleta das amostras para obtenção das curvas de secagem em pontos pré-determinados em CTDC.	47
Figura 13 - Representação da posição do anemômetro (1, 2, 3 e 4) para medição da velocidade do ar de secagem no CTDB.....	48
Figura 14 - Representação da posição do anemômetro (1, 2 e 3) para medição da velocidade do ar de secagem no CTDC.....	48
Figura 15 - Representação esquemática do processo de reidratação dos pós de milho verde..	50
Figura 16 - Aparato experimental utilizado para determinar o tempo de dispersão dos pós de milho verde.	54
Figura 17 - Evolução da temperatura da polpa durante o pré-tratamento térmico (PMV_1)...	58
Figura 18 - Termograma de calorimetria diferencial de varredura para as amostras.	60
Figura 19 - Evolução temporal da umidade durante as secagens e ajuste do modelo de Midilli, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.....	63
Figura 20 - Evolução temporal da atividade de água durante as secagens, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.	63
Figura 21 - Evolução temporal da taxa durante as secagens, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.	64

Figura 22 - Imagens termográficas da evolução da temperatura das amostras (a) PMV_0 e (b) PMV_1 durante a secagem por CTDB.	65
Figura 23 - Evolução da temperatura das amostras (a) PMV_0 e (b) PMV_1 durante a secagem por CTDC.	66
Figura 24 - Curva representativa da distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde (a) PMV_0 e (b) PMV_1 obtidos por CTDC.	68
Figura 25 - Modelo de DoubleBoltzmann para a distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde (a) PMV_0 e (b) PMV_1 obtidos por CTDC.	69
Figura 26 - Imagens fotográficas representativas das amostras PMV_0 e PMV_1. (a) polpa, (b) pós e (c) pós reconstituídos.	72
Figura 27 - Difractogramas de raios-X das amostras de pó de milho verde obtidas por CTDC.	74
Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura nas ampliações de 30, 100, 500 e 1000x para os pós obtidos através do processo de CTDC.	76
Figura 29 - Curvas de isotermas de sorção de umidade com ajuste do modelo de GAB aos dados experimentais para os pós de milho verde produzidos por CTDC.	77
Figura 30 - Curvas de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento para a polpa (a) e pó reconstituído (c) e viscosidade aparente vs taxa de cisalhamento para a polpa (b) e pó reconstituído (d).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição nutricional do milho verde em diferentes formas de consumo (100 g).	25
Tabela 2 – Processos de secagem utilizados para desidratação de milho em geral.....	31
Tabela 3 - Utilização da técnica de <i>cast-tape drying</i> em diferentes matérias-primas.	34
Tabela 4 - Informações nutricionais do milho verde em conserva da marca Quero®.	42
Tabela 5 - Análises realizadas na polpa com e sem pré-tratamento térmico, pó e pó reconstruído.	50
Tabela 6 – Atividade de água de soluções salinas saturadas a 25 °C.....	56
Tabela 7 - Concentração de glicose e amido total das amostras.	59
Tabela 8 - Temperaturas de <i>onset</i> (T_{on}), pico (T_p), <i>offset</i> (T_{off}) e valores de entalpia de gelatinização (ΔH) para as amostras.....	59
Tabela 9 - Tempo final de secagem (t_f) e os valores médios de umidade (X_{bs}) e atividade de água (a_w) das amostras (PMV_0 e PMV_1), após os processos de secagem.....	61
Tabela 10 - Parâmetros do modelo de Midilli e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) ajustado as curvas de secagens em CTDB e CTDC.	62
Tabela 11 - Rendimento após o processo de moagem e peneiramento das amostras obtidas por CTDC.	67
Tabela 12 - Umidade, atividade de água dos pós de milho verde obtidos por CTDC.	67
Tabela 13 - Tempo de dispersão dos pós de milho verde obtidos por CTDC.....	68
Tabela 14 - Parâmetros médios de distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde obtidos por CTDC.	69
Tabela 15 - Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo dos pós de milho verde obtidos por CTDC.	70
Tabela 16 - Solubilidade dos pós de milho verde obtidos por CTDC.....	71
Tabela 17 - Parâmetros de cor das amostras de milho verde obtidos por CTDC comparados com a polpa.	72
Tabela 18 - Cristalinidade relativa (CR%) das amostras de pó de milho verde obtidas por CTDC.	74
Tabela 19 - Parâmetros do modelo de GAB para os pós de milho verde produzidos por CTDC.	78
Tabela 20 - Caracterização físico-química dos pós reconstituídos comparados com as polpas iniciais.....	78

Tabela 21 - Parâmetros reológicos do modelo de Ostwald e as viscosidades aparentes na taxa de cisalhamento de 9 s^{-1} dos pós reconstituídos comparados com as amostras iniciais..... 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
AOAC	Associação de Químicos Analíticos Oficiais
CD	Secagem convectiva
CTD	<i>Cast-tape drying</i>
CTDB	<i>Cast-tape drying</i> em batelada
CTDC	<i>Cast-tape drying</i> contínuo
DRX	Difratometria de raio-X
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
FAO	Organização de Alimentos e Agricultura
GAB	Guggenheim-Anderson-de Boer
MAPA	Ministério de Agricultura e Pecuária
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
OD	Desidratação osmótica
PMV_0	Amostra do milho verde em conserva
PMV_1	Amostra do milho verde em conserva após o pré-tratamento térmico
RW	Refractance Window [®]
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VMD	Secagem por microondas a vácuo

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Tensão de cisalhamento	Pa
a^*	Cromaticidade de a	
a_w	Atividade de água	
b^*	Cromaticidade de b	
C	Constante de Guggenheim	
CE	Capacidade evaporativa	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
CR	Cristalinidade relativa	%
d	Distância	cm
dT/dx	Taxa de secagem	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
K	Constante de GAB	
K	Índice de consistência	$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$
k_1 e k_2	Inclinação no ponto de inflexão	
L	Espessura de espalhamento	mm
L^*	Luminosidade	
m_1	Massa inicial da amostra	g
m_2	massa de amostra remanescente no filtro	g
n	Índice de comportamento do escoamento (adimensional)	
P	Pressão de vapor da água no alimento	
p	Valor do fracionamento entre as duas sigmóides	
P_0	Pressão de vapor da água pura	Pa
pH	Potencial de hidrogênio	
R^2	Coefficiente de determinação	
RMSE	Raiz do erro médio quadrático	
SOL	Solubilidade	%
t	Tempo	min
UR	Umidade relativa do ar	%
UR_{eq}	Umidade relativa do ambiente	%
v	Velocidade	$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$
x	Tamanho da partícula	μm
X_{01} e X_{02}	Pontos de inflexão das sigmóides	
X_{bs}	Umidade em base seca	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
X_{bu}	Umidade em base úmida	$\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

X_c	Umidade crítica	g. g^{-1}
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	g. g^{-1}
X_m	Umidade na monocamada	g. g^{-1}
y	Frequência	Hz
y_0	Assíntota final	
ΔE	Diferença de cor	
ε	Emissividade	
η_{ap}	Viscosidade aparente	Pa.s
θ	Porosidade	%
ρ	Massa específica da polpa	kg.m^{-3}
ρ_{ap}	Densidade aparente	g.cm^{-3}
ρ_r	Densidade real	g.cm^{-3}
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	s^{-1}

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL	20
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	23
2.1 MILHO.....	23
2.1.1 Produção.....	23
2.1.2 Fisiologia do milho.....	24
2.1.3 Composição do milho	25
2.1.4 Comercialização.....	26
2.2 SECAGEM.....	27
2.3 <i>CAST-TAPE DRYING</i>	<i>32</i>
2.4 ALIMENTOS DESIDRATADOS EM PÓ	35
2.4.1 Parâmetros de qualidade em alimentos desidratados em pó	35
2.4.1.1 <i>Atividade de água.....</i>	<i>35</i>
2.4.1.2 <i>Isotermas de sorção de umidade</i>	<i>36</i>
2.4.2 Reidratação de alimentos em pó	38
2.4.2.1 <i>Reidratação de produtos amiláceos</i>	<i>39</i>
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	41
3.2 PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO.....	42
3.3 PROCESSO DE SECAGEM	43
3.3.1 <i>Cast-tape drying em batelada (CTDB)</i>	<i>43</i>
3.3.2 <i>Cast-tape drying contínuo (CTDC).....</i>	<i>44</i>
3.3.3 Condições de secagem	45
3.3.4 Cinética de secagem.....	46
3.3.5 Capacidade evaporativa (CE)	47
3.3.6 Evolução da temperatura da polpa durante a secagem.....	47
3.3.7 Velocidade do ar de secagem no CTDB e CTDC	48
3.4 MODELAGEM EMPÍRICA DA SECAGEM.....	49
3.5 MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO DO PÓ	49
3.6 RECONSTITUIÇÃO DO PÓ	49
3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	50
3.7.1 Umidade	50

3.7.2	Atividade de água	51
3.7.3	Cor	51
3.7.4	Sólidos solúveis totais	51
3.7.5	Potencial de hidrogênio (pH).....	51
3.7.6	Concentração de glicose	51
3.7.7	Amido total.....	52
3.7.8	Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	52
3.7.9	Comportamento reológico	52
3.7.10	Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo dos pós	53
3.7.11	Solubilidade.....	53
3.7.12	Tempo de dispersão.....	54
3.7.13	Distribuição do tamanho das partículas.....	54
3.7.14	Difratometria de raios-X (DRX)	55
3.7.15	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	55
3.7.16	Isotermas de sorção de umidade	56
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO	58
4.1.1	Concentração de glicose e amido total.....	59
4.1.2	Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	59
4.2	CINÉTICA DE SECAGEM.....	61
4.2.1	Evolução temporal da temperatura das amostras durante o processo de secagem	65
4.3	MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO	66
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ E PÓ RECONSTITUIDO	67
4.4.1	Umidade e atividade de água.....	67
4.4.2	Tempo de dispersão e distribuição do tamanho das partículas	68
4.4.3	Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo.....	70
4.4.4	Solubilidade.....	71
4.4.5	Cor	71
4.4.6	Difratometria de raios-X (DRX)	73
4.4.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	75
4.4.8	Isotermas de sorção de umidade	77
4.4.9	Parâmetros físico-químicos dos pós reconstituídos.....	78
4.5	COMPORTAMENTO REOLÓGICO	79
5	CONCLUSÃO	82
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83

REFERÊNCIAS	84
--------------------------	-----------

DIAGRAMA CONCEITUAL

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MILHO VERDE EM PÓ POR *CAST-TAPE DRYING*

O que?

- Estudo da secagem de polpa de milho verde por *CTD*, para a produção de milho verde desidratado em pó.

Por quê?

- O milho é um cereal com características sensoriais atrativas ao consumidor, com valor comercial na produção de pratos culturais; no entanto é sazonal e perecível necessitando de processos para aumentar sua vida útil;
- A aplicação de pré-tratamentos promove alterações na estrutura dos alimentos, o que após a secagem podem modificar as propriedades físico-químicas e reológicas do produto reidratado;
- *CTD* permite obter alimentos em pó com baixa umidade e atividade de água (a_w) em tempos curtos de secagem.

Para que?

- Desenvolver novos produtos;
- Agregar valor ao milho verde;
- Viabilizar a sua aplicação como alimento/ingrediente desidratado;
- Obter um produto com estabilidade microbiológica.

O que existe?

- Milho verde em pó comercial;
- Estudos sobre a secagem por *spray drying* para produção de milho verde em pó e rolos *drum drying* para a obtenção de flocos de milho verde.

Hipóteses

- É possível produzir um pó de milho desidratado por *cast-tape drying* (*CTD*) que seja de fácil utilização e reidratação;
- Milho verde em pó é uma alternativa como formulação para a elaboração de produtos culinários comerciais.

1 INTRODUÇÃO

Encontrados na base da pirâmide alimentar, os cereais são considerados uma boa fonte de obtenção de energia e apresentam uma composição balanceada de nutrientes essenciais para alimentação humana. Dentre eles, o milho é um dos mais consumidos no mundo. O consumo direto de milho na alimentação mundial ultrapassa 150 milhões de toneladas/ano (FAO, 2020).

Em seu estágio de maturação verde pode ser utilizado fresco, em conserva e desidratado no desenvolvimento de diferentes receitas culinárias, devido ser um produto amiláceo, possuir alto valor energético e uma importante fonte de fibra alimentar (SERNA-SALDIVAR; CARRILLO, 2019).

A retrogradação do amido durante a secagem é um dos fatores que causa diminuição indesejável da viscosidade do material seco quando reconstituído (DENG et al., 2012). A modificação do amido é uma forma eficaz de evitar alterações indesejadas na qualidade do material durante o processamento. Métodos físicos podem ser usados para introduzir novos grupos funcionais em moléculas de amido ou reduzir o tamanho molecular para melhorar a estabilidade, viscosidade e propriedades anti-retrogradação (LIU et al., 2020).

A aplicação de pré-tratamentos térmicos em alimentos amiláceos ocasionam modificações em sua composição afetando a qualidade do produto final após a secagem (GIANNETTI; BOCCACCI MARIANI; COLICCHIA, 2021). Portanto, é necessário encontrar uma tecnologia de processamento que possa produzir milho verde em pó com boas características físico-químicas e alto potencial de reidratação.

A secagem de alimentos é comumente aplicada nas indústrias alimentícias visando sua conservação por meio da redução da sua atividade de água (a_w), retardando o crescimento microbiano, as taxas de reações químicas e as atividades enzimáticas (MENON; STOJCESKA; TASSOU, 2020). Além disso, a secagem reduz o peso e o volume do alimento, diminuindo os custos de transporte e armazenamento (GRABOWSKI; TRUONG; DAUBERT, 2006).

Cast-tape drying (CTD) é um método de secagem em que uma camada fina de soluções ou suspensões viscosas são espalhadas com espessura controlada sobre suportes aquecidos para concentrá-las ou para produzir filmes, flocos ou pós (CICHELLA FRABETTI; DURIGON; LAURINDO, 2018; DURIGON et al., 2016; SIMÃO et al., 2019; ZOTARELLI et al., 2017).

É uma técnica que apresenta boa preservação das propriedades físico-química dos produtos secos, baixa degradação de nutrientes devido a utilização de temperaturas moderadas, alto rendimento e a não utilização de agentes carreadores, o que se torna alternativo aos métodos convencionais (ABONYI et al., 2002; SOUZA, 2015; ZOTARELLI et al., 2017).

A produção de pó de milho verde pode ser uma alternativa interessante, capaz de contribuir para o incremento do consumo de milho verde ao longo do ano. Além disso, a modificação da estrutura da matéria prima através da aplicação de pré-tratamentos térmicos pode contribuir para o aumento da solubilidade, porosidade e redução do tempo de dispersão das partículas influenciando diretamente na reconstituição do produto final, implicando em uma boa aplicação na preparação de receitas ou na elaboração de produtos formulados à base de milho verde (ONG; TAYLOR; RAMAIOLI, 2020).

Dessa forma, este trabalho visa produzir milho verde em pó utilizando o processo de secagem por *CTD* a fim de avaliar a aplicação de um pré-tratamento térmico na matéria-prima e as características físico-químicas e reológicas do produto obtido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é investigar a aplicação da secagem por *CTD* na produção de milho verde em pó e avaliar as propriedades físico-químicas do produto obtido, além de avaliar um pré-tratamento térmico aplicado na polpa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento da secagem por *cast-tape drying* em batelada e contínuo, analisando as cinéticas e taxas de secagem da polpa de milho verde.
- Avaliar a evolução da temperatura da polpa durante o processo de secagem e a capacidade evaporativa dos processos.
- Caracterizar os pós de milho verde e estudar a influência de um pré-tratamento térmico nas propriedades físico-químicas dos pós obtidos.
- Avaliar o comportamento físico-químico e reológico das suspensões formadas após reidratação dos pós de milho verde e comparar em relação a polpa inicial.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

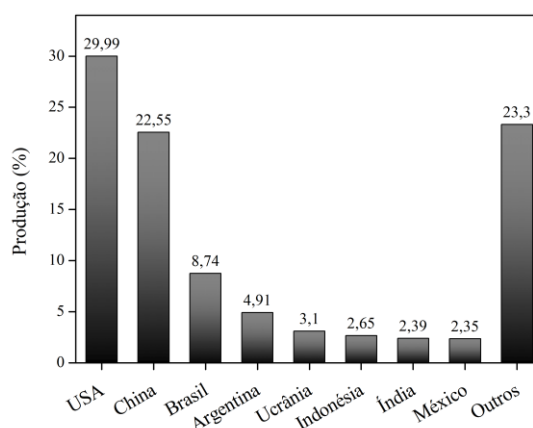
2.1 MILHO

Os cereais são os grãos mais importantes para a alimentação humana, como uma fonte primordial de obtenção de energia (FAO, 2020). O milho (*Zea mays*) pertence à família das gramíneas Poaceae (Gramineae), sendo uma planta totalmente domesticada e uma das espécies de plantas alimentícias mais produtivas. Esses cereais são relevantes na dieta humana e uma das principais fontes de nutrientes nos países em desenvolvimento, devido à sua disponibilidade e preço acessível (PALIWAL et al., 2000).

2.1.1 Produção

O milho, apesar de ter se originado em região tropical, adaptou-se e se desenvolve em uma diversidade de ambientes ao redor do mundo. Mais de 75% da produção mundial de milho é obtida em 8 países (Figura 1). Nessas regiões, os plantios são realizados onde a precipitação varia de 300 a 5.000 mm anuais. Todas as plantas de milho tendem a seguir um mesmo padrão de desenvolvimento, no entanto, variações podem ocorrer dependendo do híbrido, data de plantio e ano agrícola (RUAN et al., 2019).

Figura 1 - Distribuição da produção mundial de milho no ano de 2019.



Fonte: FAO (2019).

Atualmente, o milho é o cereal mais produzido e consumido no mundo, sendo muito cultivado pela agricultura familiar e em larga escala. No Brasil, a maior parte da produção do milho é destinada a alimentação animal (FAO, 2020).

Um relatório do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) estimou uma produção global de 1,11 bilhão de toneladas para a safra 2019/20. No Brasil, a safra 2018/19 do milho chegou a quase 100 milhões de toneladas. Um crescimento de 36,9% e expectativa de exportação recorde, de quase 35 milhões de toneladas (MAPA, 2020). Em relação a produção de milho verde, no ano de 2018, houve um resultado de 11,5 milhões de toneladas. Desse total, 5,2 milhões foram produzidas no continente americano, principalmente nos Estados Unidos e México. A tendência é que a alta produtividade de híbridos modernos e melhoramento genético ocasionará um crescimento ainda maior do mercado produtivo desse cereal (FAO, 2020).

2.1.2 Fisiologia do milho

Pertencente à família Poaceae, classificada no grupo das plantas C-4, o milho é uma espécie monóica, estival, cespitosa, com ampla adaptação a diferentes tipos de ambiente. Possui uma raiz fasciculada e o caule, um colo ereto, pode atingir 2 metros de altura, variando em função do híbrido, do fornecimento de água, condições climáticas e do solo. As folhas são estreitas e dispostas alternadamente nos nós do caule. A inflorescência masculina, denominada panícula, está situada no topo do colmo e pode produzir cerca de 50 milhões de grãos de pólen. A inflorescência feminina é conhecida como espiga. Os grãos do milho são frutos denominados cariopses, que se apresentam dispostos em fileiras regulares, presos à espiga (BARROS; CALADO, 2014). A germinação ocorre entre 6 e 15 dias após o plantio, dependendo das condições climáticas e do solo, sendo desempenhada, principalmente, por um fito hormônio chamado giberelina, que promove uma série de processos que geram a energia e os nutrientes necessários à germinação (SERNA-SALDIVAR, 2010).

Em condições normais de plantio, as sementes absorvem água e iniciam o crescimento e dentro de 4 a 5 dias a planta emerge. Seguem os estádios vegetativos até o pendoamento, quando se dá início os estádios reprodutivos, com a polinização e a fertilização. O grão vai se desenvolvendo conforme acontece o acúmulo de amido (MAGALHÃES; DURÃES, 2003). O ponto de colheita do milho verde em seu estado leitoso pode ser determinado pelo número de dias (12 a 15 dias) após a polinização (aparecimento dos “cabelos”), normalmente com umidade de 80%, o grão apresenta um fluido de cor leitosa, que representa a transformação de açúcares em amido, contribuindo para o acúmulo de matéria seca (SAWAZAKI; POMMER; ISHIMURA, 1979).

Devido ao avanço da maturação do milho verde, as reações metabólicas ocorridas após a colheita fazem com que a maior parte dos açúcares livres seja convertida a amido (KAYS;

OTHERS, 1991; POZUETA-ROMERO; PERATA; AKAZAWA, 1999). Nesse estágio o grão já apresenta pleno desenvolvimento de suas estruturas, restando os estádios de deformação do dente, maturidade fisiológica e desidratação (PEREIRA FILHO; CRUZ; GAMA, 2002).

2.1.3 Composição do milho

Em quase todos os países o consumo do milho no seu estado verde é comum, uma vez que nesse estágio a sua composição é favorável para o desenvolvimento de diferentes receitas, onde ele pode ser utilizado fresco, enlatado, congelado ou desidratado (SERNA-SALDIVAR; CARRILLO, 2019).

Os alimentos à base de milho são a principal fonte de energia, proteína, vitaminas e minerais em muitos países, principalmente em desenvolvimento. São considerados calóricos ou amiláceos e uma importante fonte de fibra alimentar (FAO, 2020). Os dados de composição do milho verde em diferentes formas de utilização estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição nutricional do milho verde em diferentes formas de consumo (100 g).

Composição	Milho <i>in natura</i>	Milho cozido	Milho enlatado
Água (g)	76,05	73,41	81,41
Calorias (kcal)	85,00	96,00	67,00
Proteína (g)	3,27	3,41	2,29
Lípidos (g)	1,35	1,50	2,00
Saturados (g)	0,32	0,19	0,25
Monoinsaturados (g)	0,43	0,37	0,37
Polinsaturados (g)	0,49	0,60	0,52
Carboidratos (g)	18,70	20,98	14,34
Açúcares (g)	6,26	4,54	4,44
Fibras (g)	2,00	2,40	2,00
Minerais			
Cálcio (mg)	2,00	3,00	3,00
Ferro (mg)	0,52	0,45	0,27
Sódio (mg)	15,00	1,00	205,00
Vitaminas			
Tiamina (mg)	0,15	0,09	0,04
Riboflavina (mg)	0,05	0,06	0,09
Niacina (mg)	1,77	1,68	1,01
Ác. Fólico (mg)	0,04	0,02	0,04
Vit. E (mg)	0,07	0,09	0,09

Fonte: USDA (2020).

O grânulo de amido de milho, geralmente, contém 25% de amilose e 75% de amilopectina (SINGH; SINGH; SHEVKANI, 2019). A amilose é essencialmente um polímero linear de unidades de glucopiranosose ligadas por meio de ligações glicosídicas, enquanto a amilopectina é um polímero altamente ramificado. A amilose e a amilopectina são empacotadas dentro dos grânulos de amido, e seu arranjo de empacotamento corresponde a cristalinidade, que varia entre os diferentes tipos de milho (WATERSCHOOT et al., 2015).

A composição do milho verde comum tem em torno de 3% de açúcares, sendo que desses 60% a 70% é amido; enquanto o milho doce tem de 9% a 14% de açúcares e cerca de 30% a 35% de amido. O milho doce é geralmente utilizado em conserva ou direto para alimentação humana. Devido a uma mutação, tem a capacidade de bloquear a conversão dos açúcares em amido, apresentando elevado teor de açúcar e sabor adocicado. Se caracteriza pela película do grão mais fina e pelo menor teor de amido, se comparado ao milho verde comum, apresentando maior maciez, o que propicia melhor qualidade para o consumo *in natura*, enlatado na forma de conserva ou processado. Seu uso para esses fins está em expansão no Brasil, mas existe certa relutância no emprego do milho doce exatamente por apresentar gosto mais doce que o milho verde comum (PEREIRA FILHO; CRUZ; GAMA, 2002).

A qualidade da proteína do milho é principalmente ditada pelo perfil de aminoácidos e digestibilidade. As digestibilidades aparentes da proteína no milho variam de 85% a 90%. Os processos de transformação físicas e químicas (como a secagem, a fermentação e a germinação) melhoram a digestibilidade das proteínas por causa da remoção da fibra e da quebra enzimática das proteínas (SERNA-SALDIVAR; CARRILLO, 2019).

2.1.4 Comercialização

A produção de milho verde tem obtido resultados expressivos de produtividade e rentabilidade, visto que ele tem maior valor de comercialização, quando comparado com o milho destinado para grãos (AZEVEDO, 2001). Sua importância econômica é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização. No Brasil, diversos pratos culinários típicos são feitos à base de milho. É comercializado a granel ou em bandejas para consumo, como milho cozido ou assado. Além disso, o milho verde é muito utilizado na elaboração de pratos típicos da culinária brasileira como pamonha, cural, creme de milho, purês, bolos ou ainda destinado à indústria para diversas aplicações (PAES, 2006).

As tecnologias empregadas para comercialização do milho verde são limitadas. Tendo em vista que, por serem colhidos ainda entre os estádios de grão leitoso e pastoso, apresentam elevada perecibilidade em razão do alto teor de umidade (LEME, 2007). Já a industrialização

do milho verde tem sido limitada apenas ao enlatamento dos grãos e em menor escala ao congelamento dos mesmos para sua conservação.

Devido à alta perecibilidade do milho verde, há a necessidade de utilizar métodos de preservação que garantam boa estabilidade reduzindo perdas nutricionais e sensoriais e que apresentem baixos custos de aplicação (DAVOODI et al., 2007). A secagem é um método de conservação de alimentos que visa a redução da atividade de água, retardando o crescimento microbiano e as velocidades das reações químicas no produto, bem como facilita o uso e diversifica a oferta do produto. Além disso, a redução do peso e do volume do alimento diminuem os custos de transporte e armazenamento (FELLOWS, 2018).

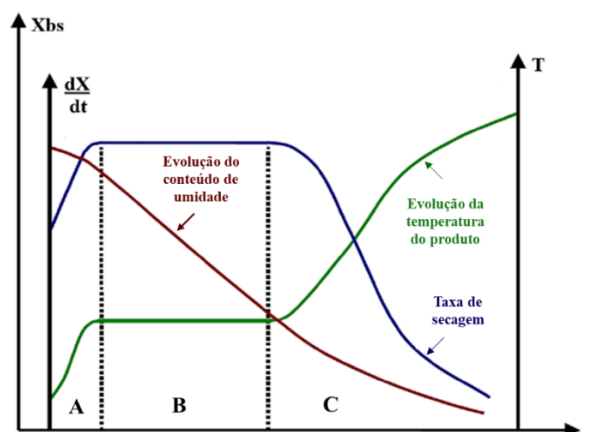
2.2 SECAGEM

A secagem é uma das operações unitárias mais aplicadas na preservação de alimentos. Consiste na redução do teor de água, retardando as reações de degradação microbiana e enzimáticas. A qualidade do produto obtido depende em grande parte da metodologia utilizada, com isso, as indústrias de alimentos enfrentam desafios de obter tempos de secagem mais curtos sob condições moderadas, além da busca por maximizar a qualidade do produto (LLAVATA et al., 2020; VEGA-MERCADO; MARCELA GÓNGORA-NIETO; BARBOSA-CÁNOVAS, 2001).

O processo de secagem baseia-se na diferença entre a pressão de vapor de água na superfície do material e a pressão de vapor de água no ar ambiente. A transferência de umidade no interior do alimento depende das características do produto, como da sua composição e estrutura, além da sua temperatura e teor de umidade. Já a transferência de umidade do sólido para o ar depende, essencialmente, da atividade de água na superfície do produto, da umidade relativa do ar e de sua velocidade de escoamento, além da área superficial do alimento (FELLOWS, 2009; RATTI, 2009).

Na Figura 2, estão representadas as curvas de evolução do conteúdo de umidade em base seca (X_{bs}), taxa de secagem (dX/dt) e evolução da temperatura do produto (T) durante o processo de secagem.

Figura 2 - Curvas típicas de secagem.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2007).

A curva de secagem, que representa a evolução do teor de umidade (X_{bs} , base seca) é obtida pela redução da umidade do produto durante a secagem sob condições definidas de processamento (umidade relativa, temperatura, velocidade do ar). A taxa de secagem, (dX/dt) é obtida pela derivada da curva de secagem em relação ao tempo. A evolução da temperatura ao longo do processo também fornece informações importantes sobre os períodos de secagem (GEANKOPOLIS, 2003).

Três etapas podem ser observadas durante o processo de secagem, representadas pelas regiões A, B e C da Figura 2. No início do processo de secagem (região A, na Figura 2), o produto está a uma temperatura inferior à temperatura do ar de secagem, dessa maneira, sua temperatura eleva-se rapidamente até atingir a temperatura de bulbo úmido do ar. Esse período inicial de ajuste é normalmente curto e desprezado no cálculo do tempo de secagem. Em seguida, ocorre o período de secagem à taxa constante (região B, na Figura 2), onde toda a superfície exposta do material está saturada de água. Essa água está livre e atua como se o material não estivesse presente. Esse período de secagem continua enquanto a água do interior do material move-se para a superfície na mesma velocidade com que evapora na superfície. Assim, a taxa de secagem depende, unicamente, da taxa de transferência de calor para o material que está sendo seco. O final desse período ocorre quando a superfície do produto fica insaturada de água, isto é, a umidade crítica (X_c) é alcançada. A partir desse ponto, a taxa de secagem começa a decrescer (FELLOWS, 2009; FOUST et al., 1982; GEANKOPOLIS, 2003; RAHMAN; PERERA, 2007).

Diversos processos são utilizados para obtenção de alimentos em pó, dentre eles estão secagem por estufas de convecção, liofilização, *spray drying*, *drum drying*, *cast-tape drying*, entre outros. A secagem por estufas de convecção é o processo mais utilizado para a produção

de frutas e hortaliças desidratados. No entanto, esse processo apresenta baixa eficiência energética, longos tempos de secagem e, na maioria das vezes, causa degradação térmica e retração da matriz sólida, reduzindo a capacidade de reidratação e a qualidade dos produtos desidratados (ORIKASA et al., 2014).

A liofilização, é aquela em que o produto é desidratado por sublimação, operando com pressões reduzidas e ocorrendo em temperaturas reduzidas, tem sido considerada um processo alternativo de desidratação para produtos termolábeis, de alto valor agregado (RATTI, 2009). Esse processo permite a produção de frutas desidratadas com estrutura preservada, alta porosidade, baixa degradação de nutrientes e cor, retenção de aroma e excelentes propriedades de reidratação ((KUDRA; MUJUMDAR, 2009). Os tempos de secagem por essa técnica são muito longos (na ordem de horas) e os altos custos limitam o uso da liofilização (VARNALIS et al., 2001).

A secagem por *spray drying* consiste em desidratar líquidos por atomização, com elevadas temperaturas e curtos tempos (na ordem de segundos). Essa técnica é muito difundida na indústria de alimentos, utilizada por exemplo para obtenção de leite em pó. O equipamento é produzido com superfícies metálicas, com elevada energia de superfície, o que pode gerar pegajosidade de alguns produtos em sua parede e reduzindo assim a produtividade. A maioria das polpas de frutas e hortaliças contém açúcares de baixo peso molecular, que conferem ao produto uma baixa temperatura de transição vítrea (T_g), dificultando a secagem por *spray drying* devido à pegajosidade durante o processamento a temperaturas acima da T_g (BHANDARI; HOWES, 2005; NINDO et al., 2003). Essa pegajosidade resulta em baixos rendimentos e superaquecimento do produto, causando degradação nas características sensoriais (BOONYAI et al., 2004). Agentes carreadores, como as maltodextrinas e as gomas, aumentam a temperatura de transição vítrea (T_g) da solução e são utilizados para reduzir esse problema (GOULA; ADAMOPOULOS, 2005). No entanto, cada vez mais os consumidores buscam por produtos sem ou com o mínimo de aditivos.

A secagem por *drum drying* é um método de secagem por camadas finas, barato, e apresenta elevadas taxas de secagem e eficiência térmica. Porém, o produto pode apresentar sabor de cozido e coloração escura, devido às altas temperaturas em curtos períodos de tempo (na ordem de minutos ou segundos) (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005).

A secagem por *CTD* vem sendo bastante utilizada por apresentar preservação das propriedades físico-química, baixa degradação de nutrientes devido a utilização de temperaturas moderadas, alto rendimento e a não utilização de agentes carreadores, o que se

torna alternativo aos métodos convencionais (ABONYI et al., 2002; DURIGON et al., 2016; ZOTARELLI et al., 2017)

Os fatores que determinam a escolha do tipo de secador a ser utilizado incluem a natureza do produto, as condições de operação e os fatores econômicos (CHUA; CHOU, 2003). Diante do exposto, na Tabela 2 são apresentados alguns trabalhos reportados na literatura que utilizam diferentes técnicas para desidratação de milho.

Tabela 2 – Processos de secagem utilizados para desidratação de milho em geral.

Processo de secagem	Estudo realizado	Resultados relevantes	Referências
CD/Liofilização	Avaliação dos parâmetros de qualidade do milho doce desidratado	Os produtos liofilizados apresentaram qualidade sensorial superior aos produtos secos por CD. Além disso, apresentaram um curto tempo de reidratação, fator de conveniência.	(WATSON et al., 1979)
<i>Drum dryer</i>	Avaliação dos parâmetros de processo de produção de flocos de milho verde.	Níveis elevados de velocidade de rotação combinado com níveis inferiores de pressão de vapor, além de resultar em valores de rendimento elevados, também originou um produto com boas características nutricionais, sensoriais e tecnológicas.	(ROSENTHAL; SGARBIERI, 1992)
<i>Spray drying</i>	Avaliação da adição de maltodextrina na produção de extrato de milho verde em pó.	A combinação de temperatura de ar de secagem de 163 °C e uma concentração de maltodextrina de 2,67% (p/p) proporcionou o melhor rendimento de secagem. Os pós obtidos apresentaram potencial físico-químico e morfologia uniforme.	(MARQUES et al., 2014a)
OD/VMD/CD/Liofilização	Avaliação do impacto da desidratação osmótica e diferentes métodos de secagem na textura e características sensoriais de grãos de milho doce.	A aplicação da OD antes da CD reduziu significativamente o tempo de secagem por micro-ondas a vácuo (VMD) em comparação com as amostras pré-secas apenas pela CD, porém prolongou o tempo total de secagem. As amostras não OD foram consideradas mais crocantes, apresentaram menos mudança de cor, menos vermelhas (mais verdes), não tinham sabor frutado e tinham menor dureza e mastigabilidade.	(CASTILLO-GIRONÉS et al., 2021)

*CD - secagem convectiva; OD - desidratação osmótica; VMD - secagem por micro-ondas a vácuo.

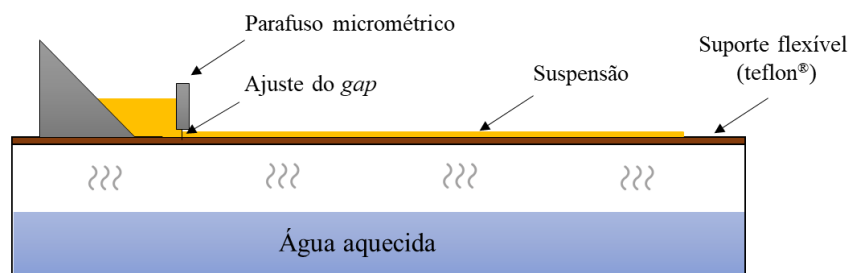
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

2.3 CAST-TAPE DRYING

Cast-tape drying (CTD) é um método de secagem na qual uma camada fina de soluções ou suspensões viscosas são espalhadas com espessuras controladas sobre suportes aquecidos para concentrá-las ou para produzir filmes, flocos ou pós (ABONYI et al., 2002; SOUZA, 2015; ZOTARELLI et al., 2017).

O espalhamento é controlado por um *doctor blade*, sobre um suporte flexível aquecido por água ou vapor na sua superfície inferior. A água evaporada deve ser retirada da superfície superior da solução submetida à secagem, o que é realizada pelo escoamento de ar. Nesse caso, o ar não fornece o calor latente para a evaporação da água, sendo apenas o veículo para retirada dos vapores produzidos durante a secagem (SIMÃO et al., 2019). Na Figura 3 é apresentado um esquema de secagem de suspensões por CTD.

Figura 3 - Esquema da secagem das suspensões por CTD.



Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2013).

O suporte flexível pode ser um filme de poliéster (Mylar®) ou de fibra de vidro revestido com Teflon®. O suporte de fibra de vidro revestido com Teflon® possui baixa energia de superfície, o que facilita a remoção do produto no final da secagem, isto é, reduz problemas de adesão do produto ao suporte. Além disso, o filme teflonado apresenta estabilidade térmica, disponibilidade no mercado nacional e menor custo (BHANDARI; HOWES, 2005; DURIGON et al., 2016).

A aplicação do CTD no processo de desidratação permite a utilização de temperaturas moderadas de secagem, geralmente entre 70 e 80 °C (ABONYI et al., 2002), e tempos de secagem relativamente curtos (na ordem de minutos). Essas condições possibilitam a secagem de alimentos com componentes termossensíveis (SOUZA, 2015; ZOTARELLI et al., 2017)

Na literatura, esse método de desidratação tem sido reportado como *refractance window* (RW) que é um caso particular do CTD, no qual utiliza suporte flexível (Mylar®) aquecido por água (contato direto). Na secagem RW, os três mecanismos de transferência de calor:

condução, convecção e radiação estão presentes (ABONYI et al., 2002; CASTOLDI et al., 2015; NINDO et al., 2003). No entanto, Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015) mostraram que a contribuição da transferência de calor por radiação é inferior a 5% do calor total transferido durante o processo de secagem por RW. Isso implica que a maior parte do calor é transferida por condução através do filme polimérico, sendo assim, possibilita a utilização de outros suportes que não são transparentes à radiação, como é o caso do CTD.

Para a secagem de polpa milho verde por *cast-tape drying* não foram reportados estudos na literatura. Na Tabela 3 são apresentados diversos estudos realizados sobre as secagens por CTD e RW, bem como os principais resultados obtidos.

Tabela 3 - Utilização da técnica de *cast-tape drying* em diferentes matérias-primas.

Matéria-prima	Estudo realizado	Resultados relevantes	Referencias
Morango e cenoura	Estudou as características de retenção de qualidade do sistema de secagem por RW e comparou com métodos de secagem convencionais.	A retenção de vitaminas e a cor foram comparáveis ao processo por liofilização.	(ABONYI et al., 2002)
Abóbora	Investigaram a eficiência energética do RW na secagem, e a redução microbiana.	Utilizando temperatura a 95 °C, alcançou teores de umidade inferiores a 5% (bu) em menos de 5 min e reduziu carga microbiana em escala log de contagens de placa aeróbia total, <i>coliformes</i> , <i>Escherichia coli</i> . e <i>Listeria innocua</i> .	(NINDO et al., 2003)
Açaí	Avaliaram a influência da espessura de espalhamento e temperatura de aquecimento nas propriedades físico-químicas do produto obtido.	A temperatura de 90 °C e espessura de espalhamento de 2 mm foram as mais adequadas para a produção industrial de açaí em pó. O processo de reidratação dos pós mostrou um comportamento reológico similar à polpa <i>in natura</i> .	(PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012)
Tomate	Produziram pó de tomate por CTD e comparou com os métodos de liofilização e <i>spray drying</i> .	O processo de secagem por CTD proporcionou alta taxa de secagem e alta capacidade evaporativa, e os pós secos por CTD apresentaram solubilidade semelhante aos secos por <i>spray drying</i> .	(DURIGON et al., 2016)
Manga	Investigaram o uso da secagem por <i>spray drying</i> e da secagem por CTD para a produção de pós de manga.	O processo por CTD permitiu a secagem da polpa de manga sem a adição de agentes carreadores. O CTD apresentou quase 100% de rendimento e os pós apresentam melhores condições críticas de armazenamento do que os pós por <i>spray drying</i> .	(ZOTARELLI et al., 2017)
Goiaba	Estudaram a influência da espessura da polpa e do tipo de suporte nas taxas de secagem da polpa de goiaba desidratada por CTD.	A secagem por CTD apresentou elevadas taxas de secagem. A utilização de suportes diferentes não alterou o processo de secagem e a polpa de goiaba apresentou menor aderência ao suporte de teflon®.	(FRABETTI; DURIGON; LAURINDO, 2018)
Cereja	Compararam as propriedades físico-químicas de pós de polpa de cereja cornalina produzidos por secagem convectiva e RW.	A secagem por RW proporcionou um aumento nas propriedades físico-químicas (temperatura de 90 °C) do que a secagem por convecção em um tempo de secagem muito curto.	(TONTUL; EROĞLU; TOPUZ, 2018)
Manga	Produziram e caracterizaram filmes de manga obtidos por CTD e avaliaram o armazenamento em diferentes URs.	Os filmes de manga produzidos pelo CTD apresentaram cor semelhante à polpa de manga <i>in natura</i> . Além disso, apresentam alta aceitabilidade quanto à aparência, cor, sabor e textura quando acondicionados a 22,5% de UR.	(SIMÃO et al., 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

2.4 ALIMENTOS DESIDRATADOS EM PÓ

Os alimentos em pó apresentam como vantagem o aumento de vida útil, além da facilidade de transporte e armazenamento, pela redução do teor de água. Além disso, possuem funcionalidades específicas podendo ser adicionados como ingredientes em diferentes formulações. Apresentam variações em suas propriedades devido à complexidade, heterogeneidade e variabilidade das matérias-primas, além da reatividade quando submetidos a altas temperaturas (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011; FITZPATRICK; AHRNÉ, 2005). A tecnologia do pó é uma questão progressivamente importante para produtores de alimentos e fabricantes de ingredientes alimentares (HICKEY; GIOVAGNOLI, 2018).

2.4.1 Parâmetros de qualidade em alimentos desidratados em pó

É necessário conhecer as características dos alimentos em pó que influenciam a estabilidade durante o armazenamento como, microestrutura, composição química, propriedades físicas e estabilidade. Normalmente, esses produtos são susceptíveis às variações ambientais, aumentando a pegajosidade e/ou a aglomeração, durante a produção e o armazenamento. O comportamento dos produtos em pó quando reconstituídos com água também é importante para a definição das suas possíveis aplicações. Podem ser aplicados diluindo em um líquido para consumir como uma bebida, ou misturados com outros ingredientes alimentícios, para formar suspensões, para uso doméstico ou industrial (CHEN; ÖZKAN, 2007; FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

2.4.1.1 Atividade de água

A atividade de água (a_w) é uma propriedade termodinâmica correlacionada com as velocidades das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas que ocorrem nos alimentos. É definida pela razão entre a pressão parcial do vapor da água contida no alimento (P) e a pressão de vapor da água pura (P_0), nas mesmas condições de temperatura e pressão (FENNEMA, 1996; TROLLER; CHRISTIAN, 2012). No equilíbrio termodinâmico, considera-se que a atividade de água do alimento é igual à umidade relativa do ambiente (UR_{eq}) (FELLOWS, 2009; LABUZA; RAHMAN, 2007). Nessa condição, a atividade de água pode ser expressa pela Equação 1.

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{UR_{eq}}{100} \quad (1)$$

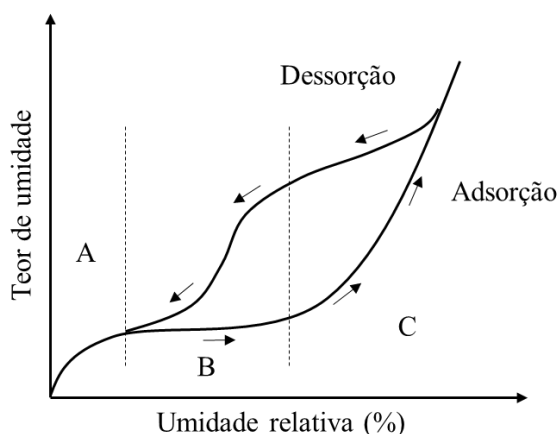
Como a atividade de água é um fator de grande importância na determinação da qualidade e segurança dos alimentos, afetando sua vida útil, textura, sabor e aroma, ela pode ser o fator mais considerável no controle da deterioração de alimentos desidratados (LABUZA; RAHMAN, 2007; TROLLER; CHRISTIAN, 2012). Alta atividade de água indica mais água livre disponível para as reações bioquímicas e, conseqüentemente, vida útil mais curta. Geralmente, alimentos com a_w menor que 0,6 são considerados microbiologicamente estáveis, logo as alterações que ocorrem nesses alimentos são induzidas principalmente por reações químicas (QUEK; CHOK; SWEDLUND, 2007).

2.4.1.2 Isotermas de sorção de umidade

A relação entre atividade de água e a umidade de equilíbrio para a maioria dos alimentos a uma temperatura particular é uma curva tipo sigmoideal, chamada de isoterma de sorção de umidade (LABUZA; ALTUNAKAR, 2020). As isotermas de sorção de umidade fornecem informações para operações de processamento de alimentos, bem como para prever a qualidade e estabilidade de um produto durante o armazenamento (PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012). As isotermas de sorção de umidade podem ser obtidas a partir de processos de adsorção (reidratação de uma amostra seca) ou processos de dessorção (desidratação de uma amostra úmida), sendo que a diferença entre essas curvas é definida como histerese (SAHIN; SUMNU, 2006).

Na Figura 4 é apresentada uma isoterma típica de sorção de umidade, na qual é dividida em três regiões distintas, as quais dependem do tipo de interação da água com os componentes do alimento.

Figura 4 - Isoterma típica de sorção de umidade.



Fonte: Adaptado de Labuza e Altunakar (2020).

Na região (A), ocorrem principalmente reações de oxidação com sítios ativos expostos, principalmente, quando a monocamada de adsorção não está completa. Na região (B), a água está mais fracamente ligada, adsorvida nas multicamadas acima da monocamada e condensada em capilares finos. Na região (C), a água está livre e encontra-se em capilares maiores. Esta água está disponível como solvente e para reações (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007; FELLOWS, 2009; SAHIN; SUMNU, 2006).

As isotermas de sorção de umidade da maioria dos alimentos são não lineares e geralmente sigmóides, mas diferem com base na composição química e na estrutura da matriz porosa dos alimentos. Diante disso, foram classificadas de acordo com a variação de umidade de equilíbrio com a atividade de água do produto (BRUNAUER et al., 1940) (Figura 5). As isotermas que mais caracterizam os alimentos são as do tipo II e III (LABUZA; ALTUNAKAR, 2020). A de tipo III é típica de produtos ricos em componentes solúveis, tais como açúcar ou sal (RAHMAN, 2008).

Figura 5 - Tipos de isotermas de sorção.



Fonte: Adaptado de Brunauer (1945).

Dentre os modelos para ajuste das isotermas de sorção de umidade, o modelo de *GAB* (Guggenheim-Anderson-de Boer), tem sido proposto na literatura para ajustar as curvas de isotermas de sorção de umidade de alimentos (Equação 2), é um das referências mais aceitas para alimentos em uma faixa de atividade de água entre 0 a 0,95 (LABUZA; RAHMAN, 2007).

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

A atividade de água que a amostra foi condicionada é definida por (a_w), a umidade de equilíbrio é expressa por (X_{eq}) (g. g⁻¹, b.s.), a umidade da monocamada é representada por (X_m) (g. g⁻¹ b.s.), a constante de Guggenheim é relacionada à energia de interação das moléculas na

monocamada e é expressa por (C) , enquanto a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas nas multicamadas é representada por (k) .

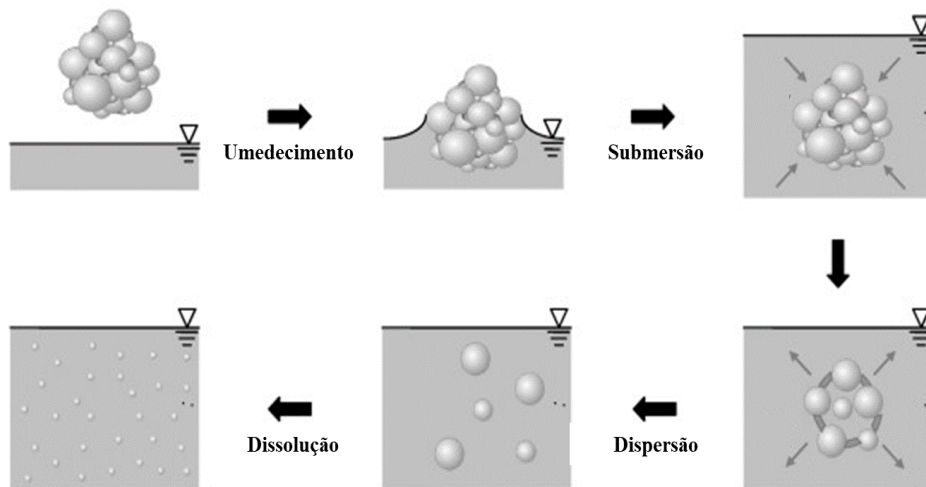
2.4.2 Reidratação de alimentos em pó

A capacidade de reidratação é um atributo essencial para o desenvolvimento de alimentos em pó, pois a maioria dos produtos em pó são dissolvidos antes de usar. A má reconstituição de produtos alimentícios em pó muitas vezes resulta em uma diminuição da aceitação do consumidor e leva a questões importantes a nível industrial. É geralmente aceito que a reidratação do pó envolve etapas separadas, mas sobrepostas (MITCHELL et al., 2015):

- (i) Umedecimento: a interface sólido-vapor é deslocada por uma interface sólido-líquido conforme o pó entra contato com o líquido.
- (ii) Submersão: após ou durante o umedecimento, o pó afunda abaixo da superfície do líquido.
- (iii) Dispersão: uma vez submersos, os aglomerados de partículas e agregados se dispersam em unidades menores.
- (iv) Dissolução: se as partículas forem quimicamente compatíveis com o meio líquido, elas se dissolverão em moléculas ou íons individuais. Se as partículas não são solúveis eles permanecerão dispersos no líquido e a dissolução completa não ocorrerá.

Essas etapas podem ser observadas no esquema apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Esquema demonstrativo da reidratação de pós em um líquido.



Fonte: Adaptado de Forny, Marabi e Palzer (2011).

Durante a reconstituição, duas ou mais etapas podem ocorrer simultaneamente, por exemplo, umedecimento e submersão, bem como dispersão e dissolução. Além disso, para pós específicos, alguns estágios podem não ocorrer ou levar mais tempo (FELIX DA SILVA et al., 2020; FITZPATRICK et al., 2016).

Muitos fatores podem afetar o comportamento de reconstituição / reidratação de um pó. Por exemplo, a composição em massa e de superfície, propriedades físicas do pó (tamanho de partícula, densidades, porosidade e morfologia), a temperatura da água e o método usado para reconstituir e avaliar o pó (CROWLEY et al., 2015; FITZPATRICK et al., 2016).

A reidratação depende do grau de rompimento celular e estrutural. Para ser ideal, ela deve ocorrer o mais rápido possível, de modo a manter as características estruturais e químicas adequadas. Isto possibilita obter uma melhor qualidade dos produtos reconstituídos, preservando características como aroma, textura e qualidade nutricional (GARCÍA-SEGOVIA; ANDRÉS-BELLO; MARTÍNEZ-MONZÓ, 2011).

2.4.2.1 Reidratação de produtos amiláceos

Para entender o processo de reidratação de pós ricos em amido é necessário compreender a natureza granular e parcialmente cristalina dos grânulos, considerando as propriedades e suas modificações químicas e físicas (JANE, 2009).

Quando os grânulos de amido de milho são adicionados a sistemas aquosos, ele absorve a água e hidrata rapidamente. Quando a temperatura de uma dispersão aquosa de grânulos hidratados é elevada, ocorrem mudanças drásticas. A água de hidratação (a água sendo um plastificante para grânulos de amido) primeiro interrompe ligações de hidrogênio nas regiões amorfas dos grânulos. Como resultado, os grânulos incham e mudam de forma, tornando-se mais esféricos (SAMAPUNDO et al., 2007). À medida que a temperatura continua a aumentar, uma maior hidratação e inchaço ocorrem nas regiões amorfas, pois as fases amorfa e cristalina estão conectadas. Os cristalitos tornam-se distorcidos e afrouxados, de modo que as cadeias de amido neles podem se tornar, pelo menos parcialmente, hidratadas / plastificadas a ponto de os cristalitos derreterem. Essa ruptura irreversível das estruturas amorfas e cristalinas é chamada de gelatinização. Durante a gelatinização, algumas moléculas de polissacarídeo de amido dissolvido (principalmente amilose) lixiviam dos grânulos inchados (BEMILLER, 2019; PÉREZ; BALDWIN; GALLANT, 2009).

O aquecimento contínuo dos grânulos de amido em excesso de água com algum cisalhamento resulta em um processo denominado gelatinização. Durante a gelatinização, ocorre mais inchaço dos grânulos, lixiviação adicional de moléculas de polímero de amido

solúvel (principalmente amilose) e ruptura dos grânulos (porque os grânulos altamente inchados são bastante frágeis). O resfriamento dessa suspensão resulta na formação de um gel (PÉREZ; BALDWIN; GALLANT, 2009).

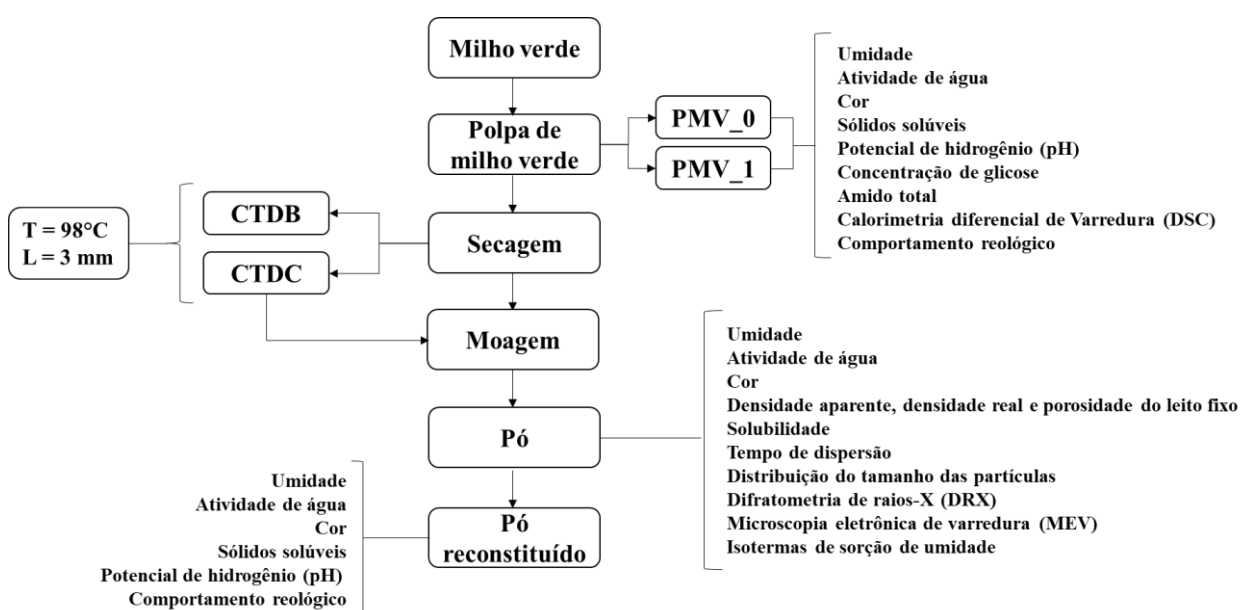
A gelatinização se refere à ruptura da ordem molecular dentro dos grânulos de amido à medida que são aquecidos na presença de água. Quando os grânulos são aquecidos em água a uma temperatura (60 – 70 °C), os grânulos incham irreversivelmente até muitas vezes do seu tamanho original (BEMILLER, 2018; BILIADERIS; MAURICE; VOSE, 1980). Esse processo torna-se importante para a indústria alimentícia, pois tem implicações diretas na textura e digestibilidade dos alimentos que contêm amido (ELIASSON; GUDMUNDSSON, 2006; HAMAKER; TUNCIL; SHEN, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo investigou-se a secagem por CTD na produção de milho verde desidratado em pó e avaliou-se as propriedades físico-químicas do produto obtido. Além disso, foi avaliada a influência do pré-tratamento térmico da polpa na secagem. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI) do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Na Figura 7 está representado o esquema do procedimento experimental utilizado neste estudo.

Figura 7 - Fluxograma representativo das etapas do estudo.



PMV_0 - polpa de milho verde em conserva; PMV_1 - polpa de milho verde em conserva após o pré-tratamento térmico; CTDB - *cast-tape dying* em batelada; CTDC - *cast-tape dying* contínuo.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A seguir todas as etapas do procedimento experimental serão explicadas.

3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A amostra de milho verde escolhida foi a do tipo em conserva, devido à dificuldade de encontrar a matéria-prima fresca ao longo de todo experimento. Milho verde em conserva (*Zea mays*, L) da marca Quero®, foi adquirido em mercado local (Florianópolis, SC, Brasil). A matéria-prima foi drenada para a remoção da salmoura e em seguida foi processada, na proporção de massa de 5:1 milho/água, utilizando um processador (Mallory Super Blender Power®, São Paulo, SP, Brasil), aplicando 4 pulsos de 50 segundos com potência de 1000 Watts

para a obtenção de uma polpa. O teor de sólido solúveis totais (SST) foi medido por um refratômetro óptico com resolução 0,1 °Brix (ATAGO, modelo PALBX/ RI, Tóquio, Japão).

A matéria-prima foi obtida do mesmo lote, visando manter a padronização e homogeneidade da amostragem. Após o preparo da polpa, foi realizado um pré-tratamento térmico, nas quais foram definidas as condições de polpa, sendo a amostra do milho verde em conserva (PMV_0) e a amostra do milho verde em conserva após o pré-tratamento térmico (PMV_1). As informações nutricionais da matéria-prima utilizada estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Informações nutricionais do milho verde em conserva da marca Quero®.

	Quantidade por porção (130g)	% VD*
Valor energético	179 kcal = 752 Kj	9
Carboidratos	37 g	12
Proteínas	8,6 g	11
Gorduras totais	0,8 g	1
Gorduras saturadas	0 g	0
Gorduras trans	0 g	-
Fibra alimentar	5,1 g	20
Sódio	447 mg	19

* % Valores Diários com base em uma dieta de 2.000 kcal ou 8.400 kJ. Seus valores diários podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades energéticas.

Fonte: produtosquero.com.br, 2021.

3.2 PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO

O pré-tratamento térmico aplicado na amostra PMV_1 foi realizado utilizando uma autoclave (Vertical, modelo AV - 18, Phoenix, Araraquara, SP, Brasil) a 120 °C durante 15 minutos. Durante o processo foi avaliada a evolução da temperatura da polpa utilizando termopares do tipo T (IOPE, A-TX-TF-R-30AWG, São Paulo, SP, Brasil), alocados em diferentes pontos, conforme apresentado na Figura 8. Os dados foram registrados em tempo real através de um sistema de aquisição de dados (Agilent, modelo 34970A, Malásia) conectado a um computador.

Figura 8 - Representação esquemática da avaliação da evolução da temperatura da amostra (PMV_1) durante o pré-tratamento térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor em BioRender.com, 2021.

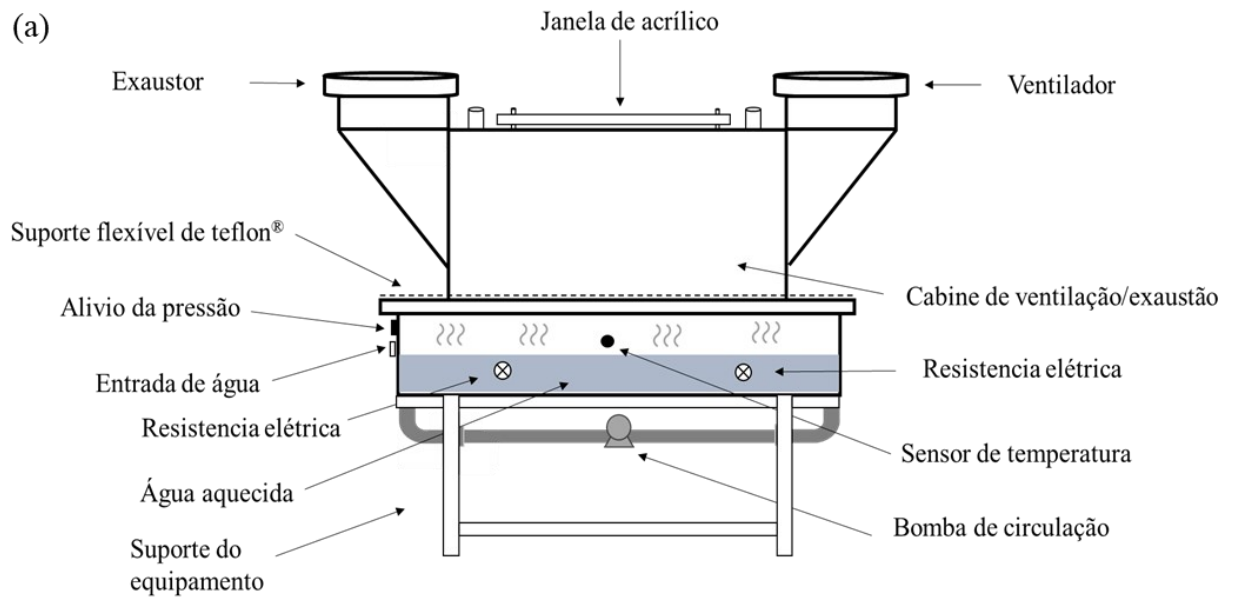
3.3 PROCESSO DE SECAGEM

As amostras PMV_0 e PMV1 foram secas em CDTB, onde foram avaliados os parâmetros finais do produto, validando a aplicabilidade do processo. Em seguida, foi realizada a secagem em CTDC, que consiste na produção dos pós em maior escala. Ambos os secadores utilizados no estudo realizado foram desenvolvidos pelo Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI).

3.3.1 *Cast-tape drying* em batelada (CTDB)

O aparato experimental utilizado no processo em batelada está representado na Figura 9.

Figura 9 – a) Aparato experimental do CTDB; b) Equipamento CTDB utilizado.



(b)



O equipamento é composto por um reservatório de aço inoxidável (0,8 m x 0,4 m x 0,20 m) e duas resistências elétricas. No seu interior, um sensor tipo PT100 (Alutal® Controles Industrial, Modelo TRS12, Brasil) foi usado para monitorar a temperatura da água. Para homogeneizar a temperatura da água foi utilizada uma bomba de circulação de água (KOMEÇO, modelo TP 40 G3, Palhoça, SC, Brasil). Foi fixado um filme de fibra de vidro com cobertura de politetrafluoretileno (Teflon®, Indaco, São Paulo, Brasil) na parte superior do reservatório, com 0,23 mm de espessura. A superfície do filme teflonado é composta por um tecido de fibra de vidro com 56% de Teflon®, o que proporciona qualidade antiaderente, resistência química e mecânica. A face inferior do filme foi mantida em contato com o vapor produzido pela água quente do reservatório, enquanto a face superior do filme serviu de suporte para o espalhamento das amostras. O espalhamento da polpa é realizado de forma manual utilizando um espalhador *doctor blade* (Tape Warehouse Fundição, modelo Doctor Blade Assembly, Morrisville, PA, EUA), que permitiu o ajuste da sua espessura a partir de parafusos micrométricos. Além disso, o aparato apresenta um sistema de exaustão/ventilação, composto por um ventilador na extremidade direita e um exaustor na extremidade esquerda (Qualitas Indústria Eletromecânica Ltda, Modelo FAQ8, Itapira, SP, Brasil). Detalhes completos sobre o equipamento utilizado podem ser encontrados no trabalho de Durigon et al. (2016).

3.3.2 *Cast-tape drying* contínuo (CTDC)

O aparato experimental utilizado no processo contínuo está representado na Figura 10. O secador é composto basicamente por dois reservatórios de aço inoxidável, um túnel de exaustão/ventilação e uma esteira flexível de transporte.

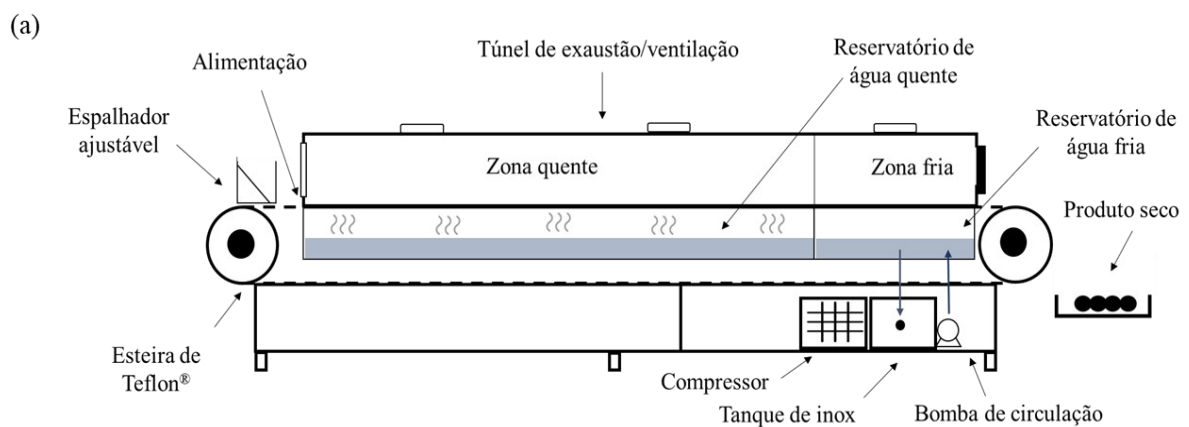
Os reservatórios formam duas zonas de secagem (quente e fria). Na zona quente, a esteira é aquecida por vapor que é gerado por resistências elétricas acopladas a um reservatório com água (2 x 0,3 x 0,3 m). Na zona fria, a esteira é resfriada por um reservatório de água (1 x 0,3 x 0,3 m). O compressor situado na parte inferior da esteira resfria a água em um tanque de inox e a envia para o reservatório utilizando uma bomba de circulação. A zona fria reduz a temperatura do produto a um valor abaixo da sua T_g visando facilitar a sua remoção (KUDRA; MUJUMDAR, 2009; NINDO et al., 2007). A temperatura da água, nos reservatórios, é medida utilizando um sensor do tipo PT100 (Alutal® Controles Industrial, Modelo TRS12, Votorantim, SP, Brasil) e controlada utilizando um controlador do tipo PID.

O túnel de exaustão/ventilação fixado sobre o secador é formado por ventiladores e exaustores que auxiliam na remoção do vapor produzido durante a secagem.

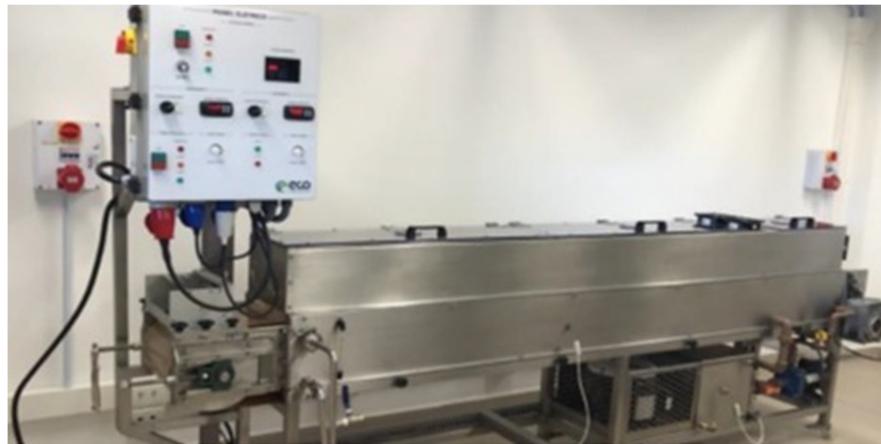
A esteira flexível de transporte é constituída de fibra de vidro revestido com Teflon® (Lençol Armalon® Standard, Indaco, São Paulo, Brasil) com espessura de 0,23 mm. A amostra é espalhada de forma contínua com auxílio de um *doctor blade* e com a movimento da esteira. A movimentação da esteira é realizada por um motor de indução trifásico, engrenagens e inversor de frequência. Esse conjunto permite o controle de velocidade da esteira.

O monitoramento dos sistemas de aquecimento, resfriamento, bombas de circulação, ventilação e controle da velocidade da esteira foram acompanhados em um painel elétrico.

Figura 10 – a) Aparato experimental do CTDC; b) Equipamento CTDC utilizado.



(b)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3.3 Condições de secagem

A umidade relativa do ar externo durante as secagens em CTDB e CTDC foi de $67,54 \pm 5,6 \%$ e a temperatura do ambiente externo $23,8 \pm 2,3 \text{ }^\circ\text{C}$. A água no interior do reservatório, para ambas as secagens, foi aquecida à temperatura de $98 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ para a produção de vapor. As polpas de milho verde foram espalhadas com uma espessura de 3 mm.

O tempo final do processo de secagem (CTDB e CTDC) foi determinado quando as amostras atingiram valores de a_w próximos de 0,4.

Para a secagem em CTDC, a velocidade da esteira foi definida por testes preliminares, no qual foi determinada pela Equação 3. Para secagem da amostra PMV_0 e PMV_1, as velocidades da esteira foram $3,51 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $2,04 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, respectivamente.

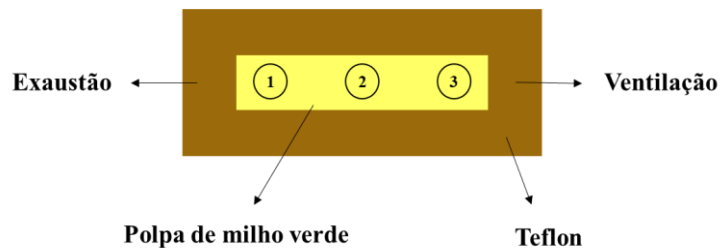
$$v = \frac{d}{t} \quad (3)$$

no qual, v é a velocidade dada em $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$, t é o tempo de secagem, d é o comprimento da esteira na zona quente.

3.3.4 Cinética de secagem

A cinética de secagem por CTDB foi realizada retirando amostras em intervalos de tempos pré-determinados. Na Figura 11 são apresentadas as regiões distintas de coleta das amostras.

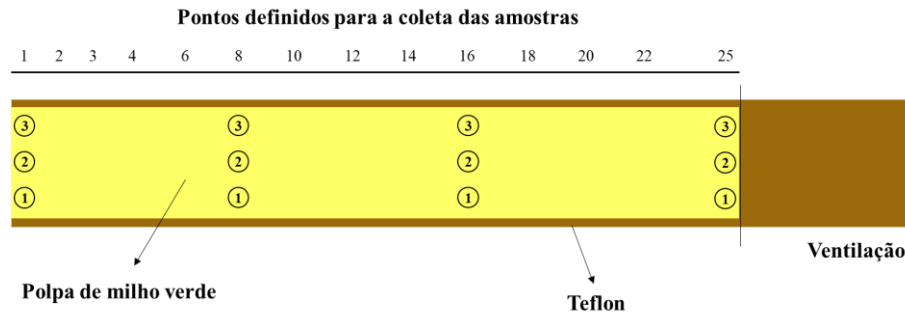
Figura 11 - Representação das regiões (1, 2 e 3) de coleta das amostras para obtenção das curvas de secagem em tempos pré-determinados em CTDB.



Fonte: Adaptado de Simão et al. (2019).

A cinética de secagem por CTDC, foi determinada através de pontos definidos na esteira para a coleta das amostras (Figura 12). A distância entre pontos foi convertida em tempo sabendo que a velocidade da esteira é conhecida e possui dois metros de comprimento que corresponde a zona quente de secagem.

Figura 12 - Representação das regiões (1, 2 e 3) de coleta das amostras para obtenção das curvas de secagem em pontos pré-determinados em CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As amostras foram analisadas quanto ao teor de umidade pelo método gravimétrico, em estufa a vácuo a 70 °C (TECNAL, modelo TE-395, Brasil), segundo a metodologia da A.O.A.C. (2005) e a_w pelo método de ponto de orvalho a 25 °C (Aqualab, Modelo Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA). As curvas de secagem foram realizadas em triplicata.

3.3.5 Capacidade evaporativa (CE)

A capacidade evaporativa do processo de secagem, dada em $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ foi determinada de acordo com a Equação 4 proposta por Durigon et al. (2016).

$$CE = \frac{dX_s}{dt} (1 - X_{bu}) \rho L_p \quad (4)$$

na qual, dX_s/dt é a taxa de secagem ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, base seca), X_{bu} a umidade inicial da amostra ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, base úmida), ρ a massa específica da suspensão ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) e L_p a espessura de espalhamento da polpa de milho verde (m). A massa específica da polpa foi determinada em um picnômetro de vidro de 100 mL.

3.3.6 Evolução da temperatura da polpa durante a secagem

Durante o processo de secagem CTDB, o perfil de evolução da temperatura das amostras foi determinado por meio de imagens termográficas, obtidas com uma câmera termográfica (FLIR, modelo T360, Suécia). Para o registro das imagens em tempos pré-determinados, a câmera foi posicionada em uma distância fixa de 1,10 m da superfície da polpa espalhada. As imagens termográficas foram analisadas por *software* FLIR QuickReport 1.2 SP2. Já para o processo de secagem CTDC, o perfil da evolução da temperatura da superfície das amostras foi

acompanhado com o auxílio de termômetro de infravermelho (FLUKE®, modelo 62 MAX +, China).

Devido à alta umidade das amostras (aproximadamente 87% b.u.), o valor da emissividade (ϵ) utilizado para a polpa foi igual ao da água, 0,96 (INCROPERA et al., 2008). A emissividade da superfície do filme teflonado foi determinada de acordo com o método proposto por Albatici et al. (2013).

3.3.7 Velocidade do ar de secagem no CTDB e CTDC

A velocidade do ar de secagem para o CTDB e CTDC foram medidos com a utilização de um anemômetro térmico compacto (Testo, modelo 425, Alemanha). O instrumento de medição foi posicionado 10 mm acima da superfície do suporte e o tempo de medição foi fixado em 1 minuto. A medição no CTDB, foi realizada em quatro regiões da cabine de ventilação/exaustão, representado pela zona de secagem, conforme ilustrado na Figura 13. A velocidade média do ar na zona de secagem variou entre $0,77 \pm 0,07$ e $2,15 \pm 0,18 \text{ m.s}^{-1}$.

Figura 13 - Representação da posição do anemômetro (1, 2, 3 e 4) para medição da velocidade do ar de secagem no CTDB.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No secador CTDC, a medição foi realizada em três regiões da cabine de ventilação, sendo duas regiões na zona quente e uma região na zona fria, conforme ilustrado na Figura 14. a velocidade média do ar na zona quente variou entre $0,34 \pm 0,03$ a $0,52 \pm 0,04 \text{ m.s}^{-1}$. Na zona fria a velocidade média do ar permaneceu em $0,59 \pm 0,03 \text{ m.s}^{-1}$.

Figura 14 - Representação da posição do anemômetro (1, 2 e 3) para medição da velocidade do ar de secagem no CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.4 MODELAGEM EMPÍRICA DA SECAGEM

Para o ajuste do modelo matemático aos dados experimentais de secagem, foi realizada uma análise de regressão não linear, empregando-se o *software* OriginPro 8.5[®]. O modelo empírico de Midilli (Equação 5) foi ajustado para simular as curvas de secagem relacionando a umidade como uma função exponencial do tempo. Para verificar o grau de ajuste do modelo, considera-se as magnitudes do coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE).

$$X_{bs} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \quad (5)$$

na qual X_{bs} é a umidade em base seca, t o tempo de secagem, k a constante de secagem do modelo, n representa a resistência interna a secagem, a e b representam constantes semiempíricas que são usadas para o ajuste do modelo.

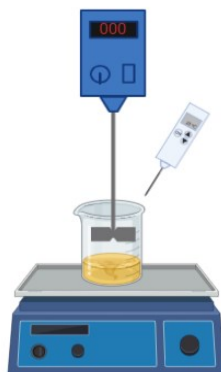
3.5 MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO DO PÓ

Após secagem e ajuste das curvas cinéticas, foram produzidos filmes de milho verde por CTDC, os quais foram moídos e seus pós foram caracterizados. O processo de moagem foi realizado em um processador (Mallory Super Blender Power[®], São Paulo, SP, Brasil). As condições do processador foram definidas em 2 pulsos de 50 segundos com potência de 1000 Watts. O pó obtido foi classificado em duas peneiras consecutivas de 25 e 32 *mesh* e em seguida foi calculado o rendimento do retido e do passante em porcentagem.

3.6 RECONSTITUIÇÃO DO PÓ

O processo de reidratação ocorreu com adição de água destilada em um béquer de vidro de 250 mL, utilizando um agitador mecânico (Agitador IKA RW20 digital, Alemanha), uma chapa aquecedora e um termômetro digital de imersão (Testo, modelo 106, Alemanha) para o controle da temperatura (Figura 15). Para isso, adicionou-se água destilada às amostras de pó para que as mesmas atingissem a umidade inicial da polpa (razão de reidratação 1:6 pó de milho verde/água). As amostras foram aquecidas e agitadas a 275 rpm até atingirem uma temperatura média de 90 °C. O tempo médio para o processo de reconstituição foi de aproximadamente 25 ± 1 minutos.

Figura 15 - Representação esquemática do processo de reidratação dos pós de milho verde.



Fonte: Elaborado pelo autor em BioRender.com, 2021.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais de estudo foram caracterizados de acordo com as análises descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Análises realizadas na polpa com e sem pré-tratamento térmico, pó e pó reconstruído.

Análise realizadas	Polpa	Pó	Pó reconstruído
Umidade	X	X	X
Atividade de água	X	X	X
Cor	X	X	X
Sólidos solúveis (°Brix)	X		X
Potencial de hidrogênio (pH)	X		X
Concentração de glicose	X		
Amido total	X		
Calorimetria diferencial de varredura (DSC)	X		
Comportamento reológico	X		X
Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo		X	
Solubilidade		X	
Tempo de dispersão		X	
Distribuição de tamanho das partículas		X	
Difratometria de raios-X (DRX)		X	
Isotermas de sorção de umidade		X	
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)		X	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.7.1 Umidade

A umidade das amostras foi determinada pelo método gravimétrico, em estufa a vácuo a 70 °C (TECNAL, modelo TE-395, Brasil), segundo a metodologia da A.O.A.C. (2005) em triplicata.

3.7.2 Atividade de água

A atividade de água das amostras foi determinada pelo método de ponto de orvalho 25 °C (Aqualab, Modelo Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA), em triplicata.

3.7.3 Cor

Os parâmetros de cor das amostras foram determinados utilizando um sistema de visão computacional, de acordo com a metodologia descrita por Cárdenas-Pérez et al. (2017), com adaptações. Uma câmera (Nikon D5500, Nikon Corporation, Japão) foi usada para obtenção das imagens. O sistema foi configurado usando o modo manual, foco automático, zoom 55, M 1/20, F 25, ISO 100. A análise das imagens foi realizada no *software* ImageJ v. 1.6.0 (National Institutes of Health, Bethesda, MD, EUA). O *plug-in* Color Space Converter foi utilizado para converter as cores do sistema RGB para a escala CIELab, resultando em valores de luminosidade L^* ($L^* = 0$: preto; $L^* = 100$: branco), e cromaticidades a^* ($+a^*$: vermelho; $-a^*$: verde) e b^* ($+b^*$: amarelo; $-b^*$: azul). A diferença de cor (ΔE) entre as amostras comparadas com a polpa inicial foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (6)$$

3.7.4 Sólidos solúveis totais

O teor de sólidos solúveis totais para as polpas e os pós reconstituídos foi determinado utilizando refratômetro óptico manual (Atago, modelo PALBX/RI, Japão), expresso em °Brix, realizadas em triplicata.

3.7.5 Potencial de hidrogênio (pH)

O pH da polpa e do pó reconstituído foi medido com a utilização de um pHmetro (Testo, modelo 205, Alemanha), realizado em triplicata.

3.7.6 Concentração de glicose

A concentração de glicose foi determinada por meio de método colorimétrico, utilizando um kit Glicose Liquiform (Labtest, Ref. 133, MS 10009010236) por meio da metodologia GOD-trinder. As amostras foram centrifugadas em centrífuga (SPLabor, SL-70, Brasil) a 6000 rpm por 10 min e lidas em espectrofotômetro UV-vis (Quimis, Q898U2M5, Brasil) no comprimento de onda de 505 nm.

3.7.7 Amido total

A análise de amido total da polpa foi realizada no Laboratório de Ciência e Tecnologia de Alimentos (LABCAL - UFSC) seguindo a metodologia da A.O.A.C. (2005).

3.7.8 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A análise de DSC foi realizada na Central de Análises do EQA - UFSC. As amostras foram fechadas em cápsulas de alumínio e analisadas em DSC Perkin-Elmer, Jade (Massachusetts, USA) equipado com um sistema Intracooler 2P, previamente calibrado com Índio e Zinco, utilizando-se gás de arraste o nitrogênio (N₂) e vazão de 20 mL. min⁻¹. Os termogramas das amostras foram obtidos em uma faixa de temperatura de 10 a 100 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹.

Os resultados foram analisados no *software* OriginPro 8.5[®], onde mudanças de primeira ordem foram calculadas pela variação de entalpia utilizando-se a integração da área do pico. O *software* também calculou as temperaturas de *onset*, de pico e de *offset*.

3.7.9 Comportamento reológico

O comportamento reológico da polpa e do pó reconstituído foi realizado no Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP - UFSC), utilizando um reômetro de placas paralelas (Haake Mars, D – 76227, Alemanha) com geometria de 25 mm de diâmetro. As curvas de tensão e viscosidade foram obtidas em função do aumento da taxa de cisalhamento de 9 s⁻¹ a 600 s⁻¹, durante 240 s. A temperatura da amostra foi mantida a 35 °C. O modelo de Ostwald ou Lei da Potência (Equação 7) foi ajustado aos dados reológicos experimentais.

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma} \cdot \eta \quad (7)$$

na qual σ é a tensão de cisalhamento (Pa), K é o índice de consistência (Pa. s⁻¹), $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento (s⁻¹) e n é o índice de comportamento do escoamento (adimensional). Para fluidos newtonianos, $n = 1$, para fluidos pseudoplásticos, $n < 1$, enquanto para fluidos dilatantes, $n > 1$ (RAO, 2007).

Para fluidos com comportamento reológico descrito pelo modelo de Ostwald, a viscosidade aparente (η_{ap}) é definida pela Equação 8.

$$\eta_{ap} = K \cdot \dot{\gamma} \cdot \eta^{-1} \quad (8)$$

3.7.10 Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo dos pós

A densidade aparente (ρ_{ap}) do leito de partículas foi calculada pela razão de massa (m_p) e o volume aparente de pó (v_{ap}). O v_{ap} foi determinado pesando 5 g de pó, que foi colocado em um tubo graduado (10 mL). A amostra foi compactada realizando batidas repetidas com o tubo em uma superfície plana até uma altura constante do leito de partículas.

A densidade real dos pós de milho verde foi realizada no Laboratório de Termodinâmica e Extração Supercrítica (LATESC - UFSC), utilizando de um picnômetro a gás hélio (Micromeritics, AccuPyc II 1340, EUA). Para a realização da análise, a amostra foi colocada em uma capsula de forma a ocupar $\frac{3}{4}$ de seu volume e posteriormente pesada. O valor da massa do pó foi inserido no *software* do equipamento para a realização das leituras. O princípio do analisador de densidade utilizado é o deslocamento de gás hélio (99,995% pureza) para o interior da amostra, medindo-se o volume transferido, que é dividido pelo valor inserido da massa de pó.

Conhecendo a densidade aparente e a densidade real das amostras, a porosidade do leito de partículas (θ) foi calculada segundo a Equação 9 (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005).

$$\theta = \frac{\rho_r - \rho_{ap}}{\rho_r} \quad (9)$$

em que, ρ_r é a densidade real ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e ρ_{ap} é a densidade aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

3.7.11 Solubilidade

A solubilidade (SOL) das amostras foi determinada pela adição de 1 g de pó em 100 mL de água destilada em temperatura ambiente (DACANAL; MENEGALLI, 2009). A análise consiste na determinação da porcentagem de material não solubilizado. As amostras foram agitadas durante 1 minuto e posteriormente filtradas a vácuo. O material retido no filtro de papel foi seco em estufa a 105 °C (TECNAL, Modelo TE-394/2, Brasil) por 24 horas. A solubilidade foi calculada a partir da Equação 10.

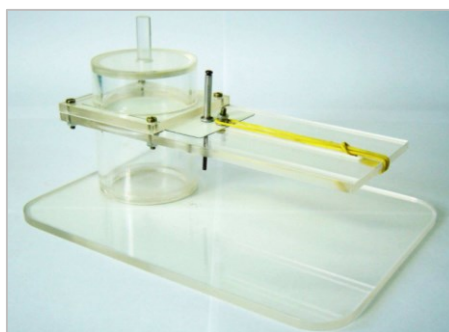
$$\text{SOL} = 100 - \left| \frac{m_1}{m_0 - X_{bu}} \cdot 100 \right| \quad (10)$$

na qual m_1 é a massa inicial da amostra (g), m_0 é a massa de amostra remanescente no filtro (g) e X_{bu} é a umidade inicial da amostra analisada em base úmida ($\text{g H}_2\text{O}\cdot\text{g}^{-1}$ sólidos totais).

3.7.12 Tempo de dispersão

O aparato experimental para o teste de dispersão dos pós está apresentado na Figura 16, desenvolvido e adaptado por Dacanal (2005), baseado no esquema apresentado por Hoge Kamp e Schubert (2003). O instrumento consiste de um reservatório com água e um compartimento para o acondicionamento do pó, separados por uma lâmina presa a um elástico através de um pino. Foram aferidos 80 mL de água destilada a 25 °C e aproximadamente 1 g de amostra, que foram devidamente colocados no aparelho, nos espaços destinados a cada um. Para o início da análise, o pino que unia a lâmina e o elástico foi retirado, fazendo com que o elástico impulsionasse a retirada da lâmina, liberando o pó sobre a água. Nesse instante, o cronômetro foi acionado e foi observado o tempo para a imersão completa da camada de partículas.

Figura 16 - Aparato experimental utilizado para determinar o tempo de dispersão dos pós de milho verde.



Fonte: Dacanal (2005).

3.7.13 Distribuição do tamanho das partículas

A distribuição do tamanho de partícula foi realizada no Laboratório Interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN - UFSC). A análise foi determinada por método de sedimentação líquida, com a utilização de uma centrífuga analítica (LUMiSizer® LS611 GmbH, Alemanha) de acordo com a ISO 13318-2. Essa técnica emprega o STEP-Technology™, na qual permite medir a intensidade da luz transmitida em função do tempo e posição ao longo de todo o comprimento da amostra simultaneamente. Os valores de transmissão são convertidos, e posteriormente, a distribuição de velocidades como resultado primário é obtida por meio do *software* SEPView. Com base na distribuição de velocidade, o *software* permite calcular a distribuição do tamanho das partículas.

Para a realização da análise, as amostras de pó foram dispersas em etanol na concentração de 1 mg mL⁻¹, em seguida foram deixadas em ultrassom durante 15 min. Os

parâmetros no equipamento foram mantidos da seguinte forma: temperatura de 25 °C, velocidade de rotação de 200 rpm, intervalo de tempo entre as medidas de 5 s e modo de posição constante definido em 115, 120 e 125.

Para avaliar a distribuição do tamanho de partículas, o modelo de Double-Boltzmann (Equação 11) foi ajustado aos dados da curva sigmoide e depois derivada obtendo-se uma curva gaussiana com distribuição bimodal.

$$y = y_0 + A \left[\frac{p}{1 + e^{-\frac{x - X_{01}}{k_1}}} + \frac{1-p}{1 + e^{-\frac{x - X_{02}}{k_2}}} \right] \quad (11)$$

na qual, y representa a frequência, x o tamanho de partícula, y_0 representa a assíntota inicial, A representa o intervalo entre y_0 e a assíntota final, p é o valor do fracionamento entre as duas sigmoides, X_{01} e X_{02} são os pontos de inflexão das sigmoides, representando os tamanhos médios e k_1 e k_2 a inclinação no ponto de inflexão representando a abertura da gaussiana quando derivada.

3.7.14 Difratomia de raios-X (DRX)

Os difratogramas de raios-X das amostras dos pós de milho verde foram obtidos em um difratômetro de raios-X (Rigaku, MiniFlex600, Alemanha) pertencente ao Laboratório interdisciplinar para o Desenvolvimento de Nanoestruturas (LINDEN - UFSC). A velocidade de varredura foi ajustada em $2^\circ \cdot \text{min}^{-1}$, o intervalo de medida foi definido para ângulos de 4° a 80° (2θ) e tamanho do passo em $0,02^\circ$ (graus).

A cristalinidade relativa das amostras foi calculada usando o método descrito por Jivan, Madadlou e Yarmand (2013). A área acima e abaixo da curva correspondeu a domínios cristalinos e regiões amorfas, respectivamente. A proporção da área superior para a área total foi tomada como o grau de cristalinidade. Com o auxílio do *software* OriginPro 8.5[®], foi calculado as áreas sobre picos e a cristalinidade relativa (CR) foi definida pela Equação 12.

$$CR(\%) = \frac{\text{Área sobre os picos}}{\text{Área total}} \times 100 \quad (12)$$

3.7.15 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite avaliar a morfologia do pó obtido. Para isso, o pó de milho verde foi disperso sobre uma fita de carbono colada em um suporte de amostra. As amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro para evitar o acúmulo de carga elétrica do feixe primário e melhorar o nível de emissão de elétrons

secundários durante o processo de obtenção das micrografias. Os ensaios foram realizados em um Microscópio Eletrônico de Varredura (Jeol, JSM – 6390 LV, Japão) do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME - UFSC). A avaliação dos pós foi realizada utilizando micrografias com ampliações entre 30, 100, 500 e 1000 vezes e feixe de elétrons com energia entre 5 e 15 keV.

3.7.16 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de umidade dos pós foram determinadas pelo método gravimétrico-estático em dessecadores. Os pós foram desidratados em um liofilizador (Liotop L101, Liobrás, São Carlos, Brasil) por 48 horas. Após este período, as amostras de aproximadamente 2,0 g foram pesadas em balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224, Japão) e colocadas em recipientes hermeticamente fechados contendo nove soluções saturadas de diferentes sais (Tabela 6). Estes recipientes foram colocados em estufa do tipo B.O.D., à temperatura de 25 °C. O equilíbrio foi considerado quando a diferença entre a pesagem das amostras foi inferior a 1mg.g⁻¹. O teor de umidade das amostras foi determinado em estufa a vácuo a 70 °C (TECNAL, modelo TE-395, Brasil).

Tabela 6 – Atividade de água de soluções salinas saturadas a 25 °C.

Soluções salinas saturadas	Atividade de água (a _w)
Cloreto de lítio	0,115
Acetato de potássio	0,228
Cloreto de magnésio	0,332
Carbonato de potássio	0,440
Nitrato de magnésio	0,537
Nitrito de sódio	0,652
Cloreto de sódio	0,759
Cloreto de potássio	0,846
Cloreto de bário	0,901

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer), apresentado na Equação 13, foi ajustado aos dados experimentais para descrever o comportamento das isotermas.

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + C \cdot k \cdot a_w)} \quad (13)$$

na qual, X_{eq} é a umidade de equilíbrio (g g^{-1} b.s.), a_w é a atividade de água referente à umidade relativa de referência a qual a amostra foi condicionada, X_m é a umidade da monocamada (g g^{-1} b.s.), C é a constante de Guggenheim relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada, enquanto k é a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada.

Os parâmetros foram estimados utilizando o *software* OriginPro 8.5[®]. Para avaliar a adequação do modelo aos dados experimentais, utilizou-se o coeficiente de correlação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram tratados estatisticamente utilizando o *software* Statistica 12.0 (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), através de análise de variância (ANOVA). A comparação múltipla das médias foi realizada pelo teste de Tukey, com nível de confiança de 95%.

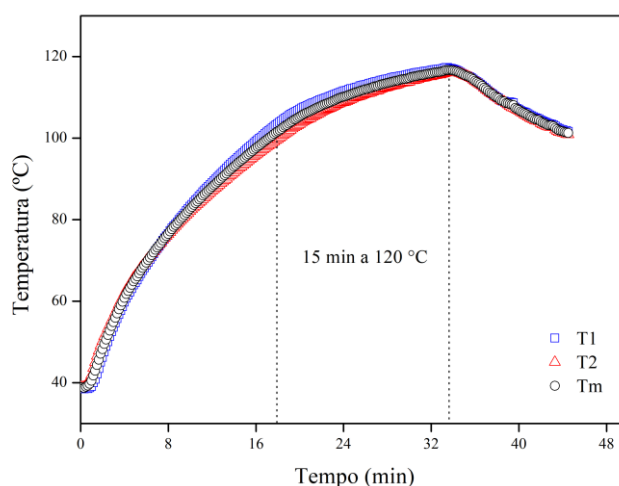
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão abordados os resultados referentes a aplicação do pré-tratamento térmico na polpa de milho verde, o processo de secagem em batelada e contínuo e a produção e caracterização dos pós obtidos por CTDC.

4.1 PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO

Na Figura 17 são apresentadas as curvas de evolução da temperatura da polpa de milho verde durante a aplicação do pré-tratamento térmico em autoclave. A amostra foi tratada em autoclave por 15 min a 120 °C (2 atm). Nesse período, a temperatura da amostra atinge valores entre 100 a 115 °C. A aplicação controlada de temperaturas elevadas altera a morfologia da matéria-prima, como o amolecimento dos tecidos. No caso de cereais, isso promove uma modificação na reologia da polpa resultante desenvolvendo características sensoriais e físico-químicas que permitem uma variedade de alimentos para disposição aos consumidores (ZAGO, 2018).

Figura 17 - Evolução da temperatura da polpa durante o pré-tratamento térmico (PMV_1).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A polpa de milho verde (PMV_0) utilizada neste estudo apresentou teor de umidade média em base seca (X_{bs}) de aproximadamente $7,186 \pm 0,083 \text{ g g}^{-1}$ e a_w de $0,998 \pm 0,002$. Após o pré-tratamento térmico, a polpa (PMV_1) apresentou X_{bs} de $7,064 \pm 0,075 \text{ g g}^{-1}$ e a_w de $0,997 \pm 0,003$. O pré-tratamento térmico não alterou de forma significativa ($p \leq 0,05$) a umidade e

atividade de água das amostras. No entanto, reduziu significativamente o pH de $6,48 \pm 0,02$ para $6,34 \pm 0,02$ e o teor de sólido solúveis de $8,9 \pm 0,1$ °Brix para $7,9 \pm 0,1$ °Brix.

4.1.1 Concentração de glicose e amido total

Na Tabela 7, estão expostos os valores da concentração de glicose e amido total. É possível observar que houve uma redução significativa no teor de glicose para a amostra PMV_1. O teor açúcar expresso em concentração de glicose foi afetado pelo pré-tratamento térmico, uma vez que quando a amostra foi submetida a uma temperatura elevada, os níveis de açúcar reduziram decorrente da degradação térmica causada pela ação do calor (CHEN; O'MAHONY, 2016). Uma parte da glicose também pode ter sido solubilizada na água.

O amido total para a amostra PMV_1 reduziu. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza da amostra, tempo e temperatura do pré-tratamento térmico que podem levar a alterações na estrutura do amido, causando alterações nas cadeias de amilose e amilopectina, reduzindo os níveis desse componente (HUANG et al., 2015; KLANG et al., 2019).

Tabela 7 - Concentração de glicose e amido total das amostras.

Amostra	Concentração de glicose (mg.mL ⁻¹)	Amido total (g.100g ⁻¹)
PMV_0	$1,40 \pm 0,08^b$	4,9
PMV_1	$1,18 \pm 0,06^a$	3,9

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.1.2 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A entalpia de gelatinização é medida a partir do pico endotérmico resultante da transição de fase do material. A variação de entalpia (ΔH) sinaliza a perda da organização molecular devido à quebra de ligações de hidrogênio dentro do grânulo, fornecendo um indicativo da presença da estrutura cristalina do amido (EK; BRAND-MILLER; COPELAND, 2012).

Os parâmetros dos termogramas do DSC das amostras estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Temperaturas de *onset* (T_{on}), pico (T_p), *offset* (T_{off}) e valores de entalpia de gelatinização (ΔH) para as amostras.

Amostra	T_{on} (°C)	T_p (°C)	T_{off} (°C)	ΔH (J/g)
PMV_0	63,97	68,64	74,49	3,93
PMV_1	-	-	-	-

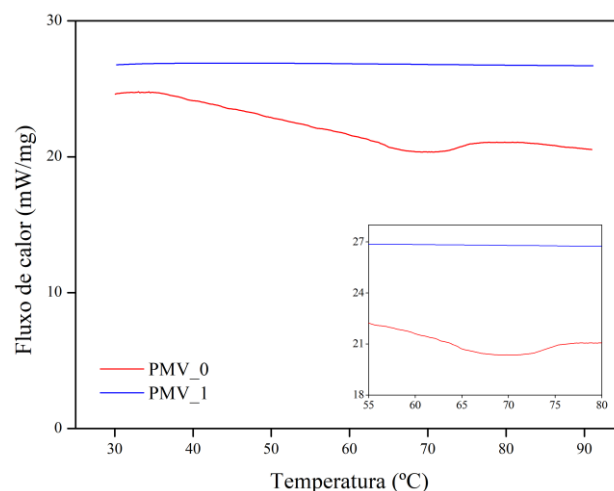
*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O perfil de gelatinização para a amostra PMV_0 pode ser observado pelo pico endotérmico (T_{on}) de 63,97 °C, na qual apresentou valores de entalpia (ΔH) de 3,93 J/g. Perera et al. (2001) relataram valores de T_{on} para amidos de milho normais sendo próximos a 64,4 °C, similares ao encontrado nesse estudo.

O baixo valor de (ΔH) está correlacionado com a baixa cristalinidade do amido de milho doce (XIE et al., 2020). Valores próximos de mudança de entalpia (ΔH) 5,6 J/g foram relatados por Peng e Yao (2018), no estudo de pequenos grânulos de diferentes amidos de milho. No entanto, deve-se levar em consideração que a gelatinização da amostra corresponde ao amido isolado.

O termograma de DSC para as amostras PMV_0 e PMV_1, estão apresentadas na Figura 18.

Figura 18 - Termograma de calorimetria diferencial de varredura para as amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na literatura foi relatado que os valores de entalpia de gelatinização dos amidos são afetados por fatores como a forma do grânulo e a porcentagem de grânulos grandes e pequenos (SANDHU; SINGH; KAUR, 2004). Para a amostra PMV_1, não foi observado nenhuma mudança endotérmica, o que indica que o amido presente na amostra está completamente gelatinizado.

4.2 CINÉTICA DE SECAGEM

Na Tabela 9 são mostrados o tempo final de secagem (t_f) e os valores médios de umidade (X_{bs}) e atividade de água (a_w) das amostras (PMV_0 e PMV_1) desidratadas por CTDB e CTDC.

Após os processos de secagem, as amostras foram consideradas microbiologicamente estáveis, apresentando X_{bs} e a_w de aproximadamente 0,03 g.g⁻¹ e 0,4, respectivamente. Além disso, observou-se um aumento no tempo total de secagem para a amostra PMV_1 quando comparada à amostra PMV_0, indicando que o pré-tratamento térmico aplicado aumentou em aproximadamente 1,5 vezes o tempo de secagem.

O tempo de secagem para as amostras secas por CTDC foi aproximadamente 2,3 vezes maior que CTDB, o que não foi investigado neste estudo. No entanto, essa diferença pode estar associada à eficiência da transferência de calor e massa no secador CTDB, o qual apresenta velocidade do ar de secagem variando entre $0,77 \pm 0,07$ e $2,15 \pm 0,18$ m.s⁻¹, enquanto no CTDC a velocidade do ar variou entre $0,34 \pm 0,03$ a $0,52 \pm 0,04$ m.s⁻¹.

Na secagem para ambos os processos, foi possível observar que na amostra PMV_0 a água tem uma maior facilidade de ser removida durante a secagem. Enquanto, na amostra PMV_1, a migração de água pode estar reduzida pela sua forte ligação às partículas de fibras e ao amido gelatinizado e a diversas macromoléculas, devido à transformações causadas pelo pré-tratamento térmico (HE et al., 2021).

A aplicação de pré-tratamentos com alta temperatura em amostras que contêm amido afetam a região amorfa dos grânulos, induzindo à formação de uma rede amido-água em que há uma melhor distribuição das moléculas de água ligadas ao amido, dificultando a evaporação da água (EK; BRAND-MILLER; COPELAND, 2012; MALUMBA et al., 2010).

Tabela 9 - Tempo final de secagem (t_f) e os valores médios de umidade (X_{bs}) e atividade de água (a_w) das amostras (PMV_0 e PMV_1), após os processos de secagem.

Processo	Amostra	$X_{bs\ final}$ (g.g ⁻¹)	$a_w\ final$	t_f (min)
CTDB	PMV_0	$0,023 \pm 0,004^a$	$0,371 \pm 0,023^a$	26
	PMV_1	$0,042 \pm 0,006^a$	$0,393 \pm 0,031^{ab}$	40
CTDC	PMV_0	$0,038 \pm 0,010^a$	$0,427 \pm 0,004^{ab}$	57
	PMV_1	$0,038 \pm 0,025^a$	$0,438 \pm 0,022^b$	98

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A evolução temporal da umidade (bs) e da atividade de água durante os processos de secagem estão representadas nas Figura 19 e 20, respectivamente. As triplicatas dos processos indicaram boa reprodutibilidade das secagens.

Na Figura 19, também apresenta-se o modelo de Midilli et al. (2002) ajustado aos dados experimentais. Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros do modelo de Midilli ajustado aos dados experimentais. O modelo apresentou um bom ajuste, com valores de R^2 superiores a 0,98 e RMSE inferiores a 0,3, resultado de uma boa aproximação entre os valores observados e preditos. Os coeficientes empíricos a e b , são constantes experimentais utilizadas para o ajuste do modelo, k representa a constante de secagem e n a resistência interna a secagem (MENGES; ERTEKIN, 2006). Não houve variações consideráveis para os parâmetros a e n nos processos por CTDB e CTDC. O parâmetro b apresentou valores próximos a zero, sendo considerados insignificantes no ajuste.

Para ambos os processos, o valor de k foi superior para a amostra PMV_1, esse parâmetro pode ser explicado pela taxa de secagem que foi superior no início do processo para a amostra tratada termicamente. A perda de água inicial é superior, no entanto, apresenta um maior tempo de secagem devido a uma película que é formada no qual interfere na saída de água da amostra durante a fase final do processo de secagem.

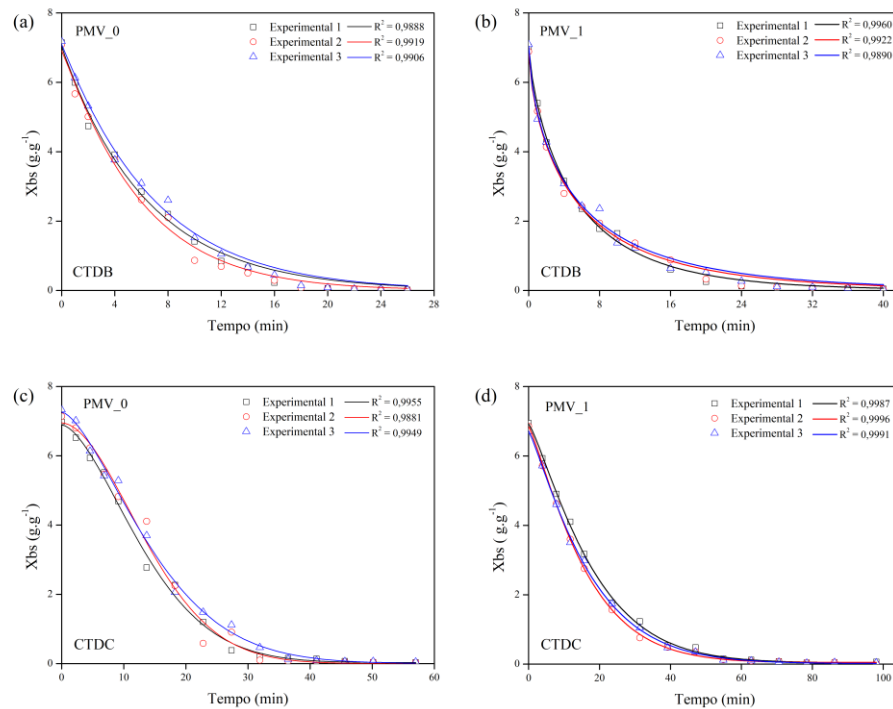
Tabela 10 - Parâmetros do modelo de Midilli e seus coeficientes de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) ajustado as curvas de secagens em CTDB e CTDC.

Processo	Amostra	Repetição	Constantes do modelo				R^2	RMSE
			a	k	n	b		
CTDB	PMV_0	1	7,0361	0,1571	0,9959	0*	0,9888	0,2532
		2	6,9166	0,1476	1,0655	0*	0,9919	0,2141
		3	7,0957	0,1345	1,0353	0*	0,9906	0,2421
	PMV_1	1	7,0116	0,2715	0,7712	0*	0,9960	0,1388
		2	6,8995	0,3103	0,6876	0*	0,9922	0,1861
		3	7,0436	0,3201	0,6658	0*	0,9890	0,2242
CTDC	PMV_0	1	6,8941	0,0107	1,6439	0*	0,9955	0,1817
		2	6,9508	0,0056	1,8363	0*	0,9881	0,3090
		3	7,2625	0,0130	1,5363	0*	0,9949	0,2002
	PMV_1	1	6,9219	0,0272	1,2214	0*	0,9987	0,0863
		2	6,8465	0,0340	1,1963	0*	0,9996	0,0487
		3	6,7149	0,0340	1,1695	0*	0,9991	0,0698

* Coeficiente b resultou em valor insignificante.

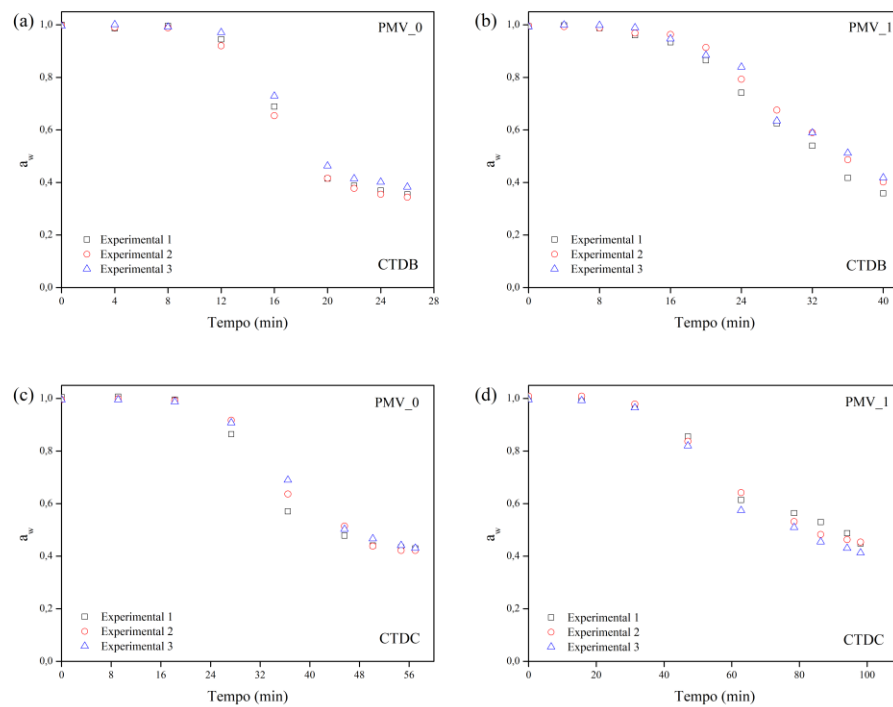
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 19 - Evolução temporal da umidade durante as secagens e ajuste do modelo de Midilli, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 20 - Evolução temporal da atividade de água durante as secagens, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.

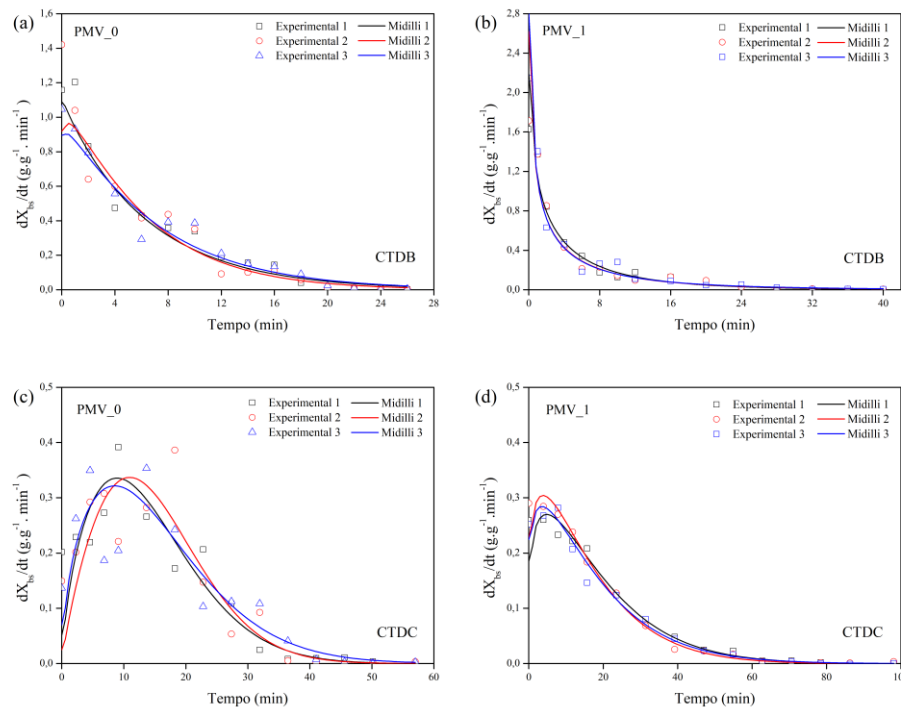


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na Figura 21 estão apresentadas as curvas de evolução da taxa de secagem para os processos por CTDB e CTDC. Durante o período inicial, o teor de umidade diminui rapidamente para as amostras durante a secagem por CTDB visto que as curvas decrescem rapidamente e se mostram em equilíbrio quando o teor de água está próximo ao esgotamento. No entanto, para o processo CTDC é possível observar um período de adaptação inicial da amostra durante a secagem.

Nas secagens CTDB (Figura 21a e 21b), a taxa de secagem é decrescente, indicando que ocorre uma maior resistência à transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície e, portanto, a difusão é o principal mecanismo que governa o movimento de água (AKPINAR; TORAMAN, 2016). Para o processo CTDC (Figura 21c e 21d), inicialmente, a taxa de secagem aumenta, devido ser um processo contínuo a amostra eleva sua temperatura gradualmente no início do processo à medida que a secagem avança. A alta diferença de umidade entre a amostra e o ar circundante também contribui para o aumento da taxa de evaporação de umidade. Quando a polpa atinge uma temperatura elevada, a taxa de secagem passa a diminuir com a redução do teor de umidade, pois a água a ser evaporada vem das partículas internas da película que está sendo secada (KASHANINEJAD et al., 2007).

Figura 21 - Evolução temporal da taxa durante as secagens, realizados em triplicata. (a) PMV_0 – CTDB; (b) PMV_1 – CTDB; (c) PMV_0 – CTDC; (d) PMV_1 – CTDC.



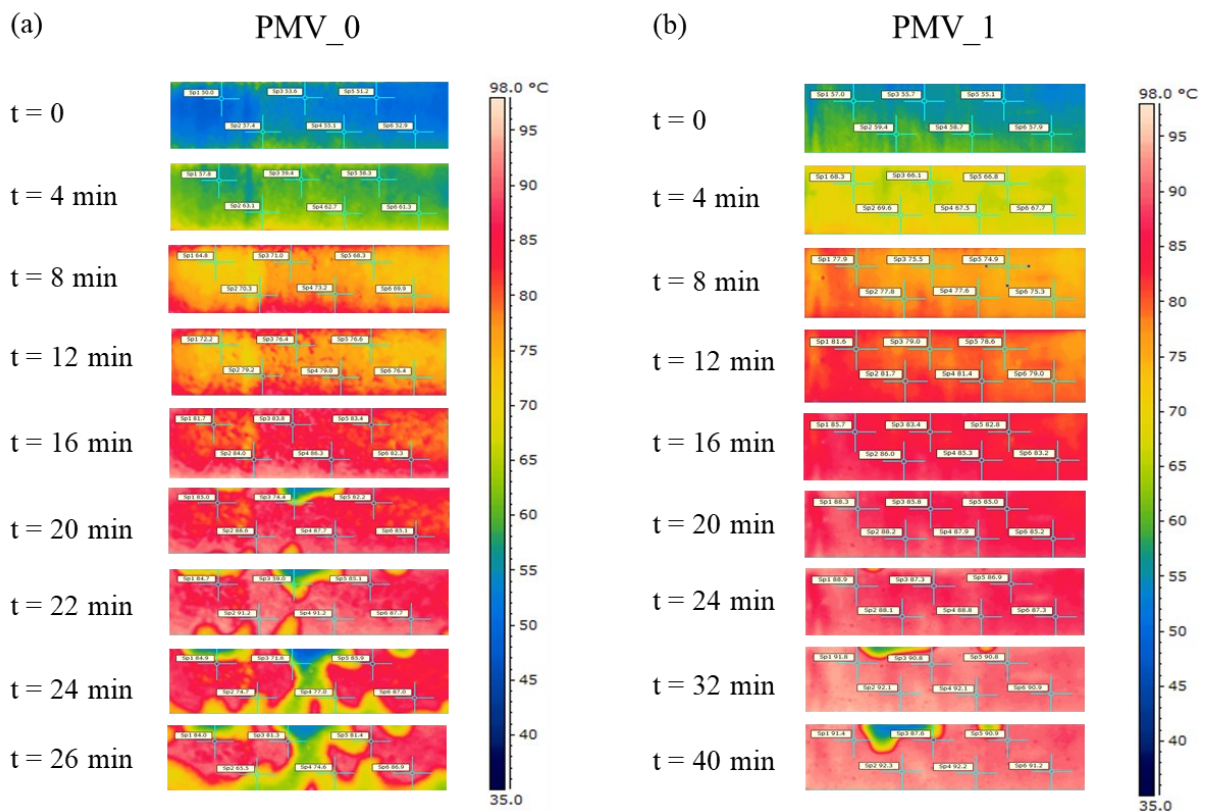
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para calcular a capacidade evaporativa (CE) dos processos, as massas específicas das amostras PMV_0 e PMV_1 foram de $1000,4 \text{ kg.m}^{-3}$ e $1031,5 \text{ kg.m}^{-3}$, respectivamente, e as umidades iniciais, para ambas as condições, foram iguais a $0,87 \text{ kg.kg}^{-1}$ (b.u.). Para o processo em CTDB a CE média dos processos para as amostras PMV_0 e PMV_1 foram de $6,05 \pm 0,04$ e $4,12 \pm 0,06 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, respectivamente. Para o processo por CTDC a CE média para as amostras PMV_0 e PMV_1 foram de $2,76 \pm 0,06$ e $1,74 \pm 0,03 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, respectivamente. Esses resultados foram inferiores aos reportados por Cichella Frabetti et al. (2018) estudando secagem de polpa de goiaba por *cast-tape drying* em batelada, que relatou valores de CE $9,9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para uma espessura 3 mm.

4.2.1 Evolução temporal da temperatura das amostras durante o processo de secagem

A evolução temporal da temperatura das amostras durante o processo de secagem por CTDB, estão representadas na Figura 22.

Figura 22 - Imagens termográficas da evolução da temperatura das amostras (a) PMV_0 e (b) PMV_1 durante a secagem por CTDB.

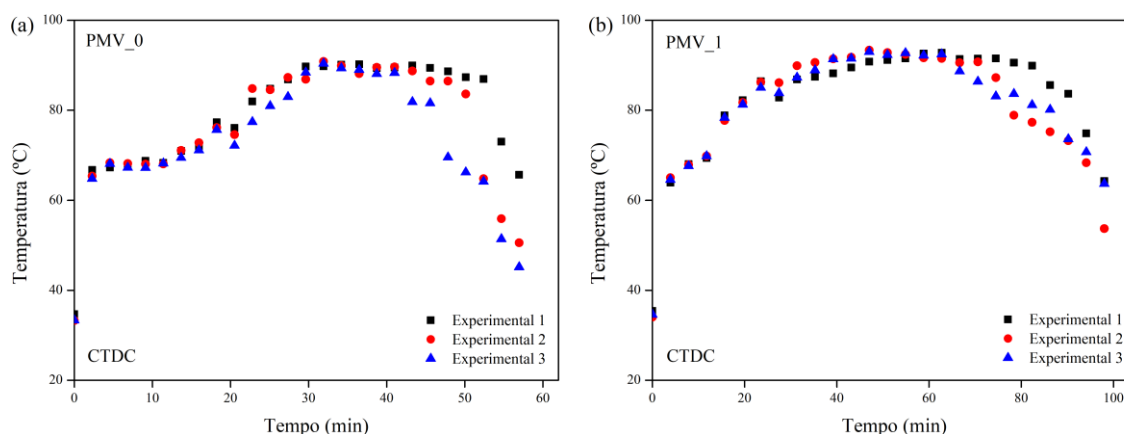


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No início do processo, as amostras são espalhadas no suporte a uma temperatura de 30 ± 5 °C, após isso, a temperatura da polpa aumenta instantaneamente. Durante o processo de secagem, a amostra PMV_0 (Figura 22a) atinge uma temperatura aproximadamente 85 °C em 20 min de processo, no qual já é possível observar o desprendimento das amostras do teflon[®], indicado pela redução da temperatura da polpa em alguns pontos. Em relação a amostra PMV_1 (Figura 22b), é possível observar que em 16 min de processo a amostra atinge uma temperatura superior a amostra PMV_0, sendo em torno de 90 °C, a partir disso, a temperatura aumenta progressivamente, até a amostra começar a despegar do teflon[®]. A temperatura atingida pela polpa durante a secagem foram similares aos relatados por autores que estudaram secagem de polpa de frutas por CTD (SOUZA et al., 2015; DURIGON et al., 2016; ZOTARELLI et al., 2017; FABRETTI et al., 2018).

Na Figura 23 estão apresentadas as curvas de evolução da temperatura da polpa de milho verde durante a secagem CTDC. Inicialmente é possível observar o aumento da temperatura até aproximadamente 65 °C para ambas as amostras. No entanto, com o decorrer do processo de secagem a amostra PMV_1 (Figura 23b) atinge uma temperatura superior a amostra PMV_0 (Figura 23a), comportamento semelhante ao observado por CTDB. Ao fim do processo é possível observar uma redução da temperatura, uma vez que a amostra seca inicia o processo de desprendimento do Teflon[®].

Figura 23 - Evolução da temperatura das amostras (a) PMV_0 e (b) PMV_1 durante a secagem por CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.3 MOAGEM E CLASSIFICAÇÃO

Após o processo de secagem, as amostras foram moídas e peneiradas, controlando o tempo de processo. Esse procedimento foi padronizado, pois as propriedades físico-químicas e

a estrutura do pó podem ser afetadas pelo tipo de moagem (RAMACHANDRAIAH; CHIN, 2016; ZHAO et al., 2009). Na Tabela 11 são apresentados os rendimentos do peneiramento das amostras. O rendimento total do passante em uma peneira de 32 *mesh* (abertura 0,5 mm) foi superior a 97%, para ambas as amostras.

Tabela 11 - Rendimento após o processo de moagem e peneiramento das amostras obtidas por CTDC.

Pó	25 <i>mesh</i>	32 <i>mesh</i>	% Passante
PMV_0	1,25 ± 0,28	1,60 ± 0,19	97,78 ± 0,47
PMV_1	1,63 ± 0,26	2,44 ± 0,61	97,69 ± 0,73

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ E PÓ RECONSTITUIDO

4.4.1 Umidade e atividade de água

A Tabela 12 apresenta os valores de umidade e atividade de água dos pós obtidos pelo processo contínuo.

Tabela 12 - Umidade, atividade de água dos pós de milho verde obtidos por CTDC.

Pó	X_{bs} (g.g ⁻¹)	a_w
PMV_0	0,054 ± 0,005 ^a	0,438 ± 0,019 ^a
PMV_1	0,048 ± 0,002 ^a	0,448 ± 0,019 ^a

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

É possível observar que não houve diferença significativa para a umidade e atividade de água dos pós. Os pós de milho verde apresentaram valores $X_{bs} \approx 0,05$ g.g⁻¹ e $a_w < 0,45$, o que provavelmente garantem a sua estabilidade físico-química, sensorial e microbiológica durante o armazenamento (JUNQUEIRA et al., 2017; MOKHTAR; SWAILAM; EMBABY, 2018). Os valores obtidos estão próximos dos valores encontrados na literatura, no entanto é necessário ressaltar que os parâmetros de umidade e atividade de água finais das amostras dependem das condições de secagem, da espessura de espalhamento e do tempo e da temperatura de secagem. Durigon et al. (2016) estudaram a secagem de suco de tomate puro com adição de maltodextrina por CTD e relataram valores de X_{bs} entre 0,028 e 0,048 g.g⁻¹ e a_w de 0,4, próximos aos encontrados nesse estudo. Marques et al.(2014b) reportaram valores de X_{bs} entre 0,011 a 0,029 g.g⁻¹ e a_w entre 0,06 a 0,09 de pós de milho verde desidratados por *spray drying* em

diferentes condições de processo. Entretanto, produtos com valores de a_w menores que 0,1, são susceptíveis a oxidação lipídica (LABUZA; ALTUNAKAR, 2020).

4.4.2 Tempo de dispersão e distribuição do tamanho das partículas

Na Tabela 13 são mostrados o tempo de dispersão dos pós obtidos pelo processo em CTDC.

Tabela 13 - Tempo de dispersão dos pós de milho verde obtidos por CTDC.

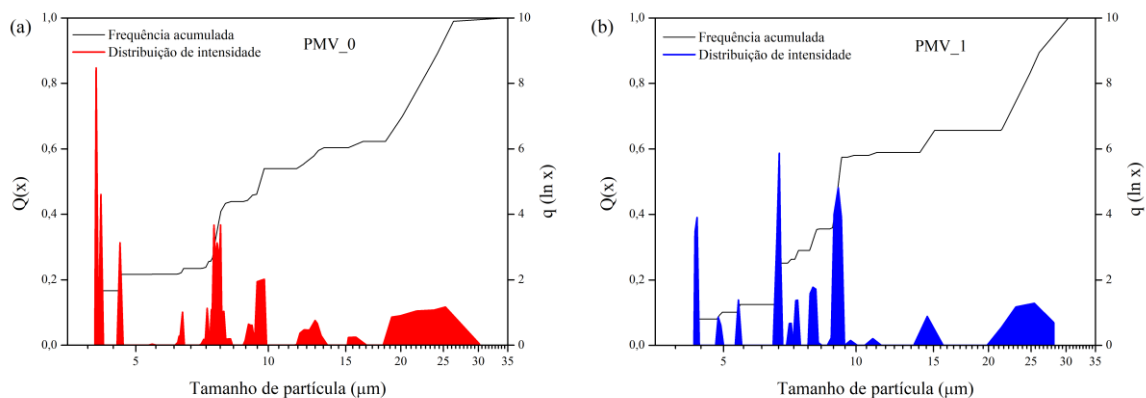
Pó	Tempo de dispersão (s)
PMV_0	$16,77 \pm 0,488^b$
PMV_1	$8,28 \pm 0,841^a$

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O pré-tratamento térmico aplicado à amostra PMV_1 reduziu o tempo de dispersão em relação à amostra PMV_0, apresentando diferença significativa entre as amostras ($p \leq 0,05$). Os pós apresentaram tempos curtos de dispersão em água, o que indica que possuem uma boa característica de molhabilidade.

Na Figura 24 é apresentado o perfil de distribuição de tamanho de partícula representativo obtido para as amostras PMV_0 e PMV_1. Nesse perfil, os dados de volume cumulativo ponderado ($Q(x)$) e volume diferencial ponderado ($q(\ln x)$) apresentam um comportamento bem disperso, não sendo possível determinar um tamanho médio diretamente a partir desse gráfico.

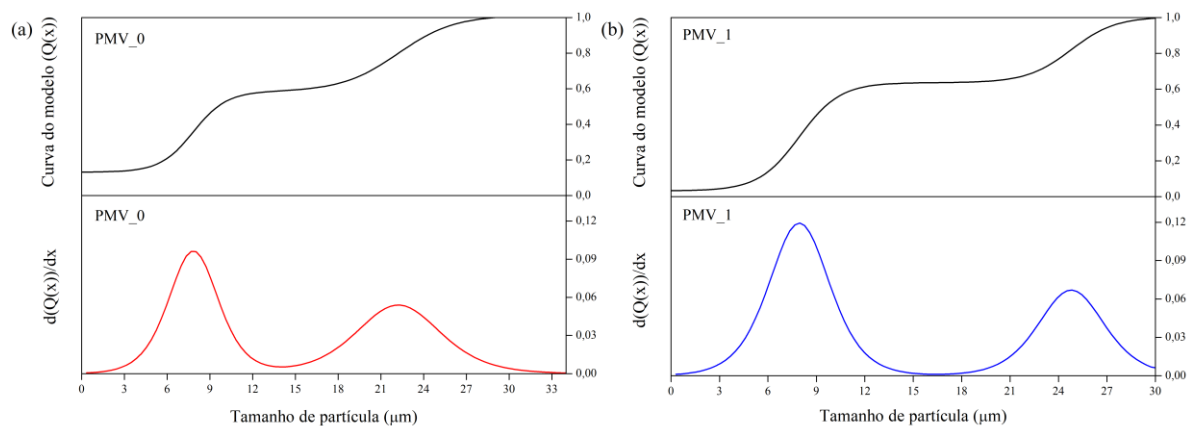
Figura 24 - Curva representativa da distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde (a) PMV_0 e (b) PMV_1 obtidos por CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Analisando o gráfico é possível observar um comportamento multimodal para o tamanho das partículas, com isso, para obter um tamanho médio de partícula foi aplicado o ajuste de um modelo sigmoide bimodal (DoubleBoltzmann) aos dados de $Q(x)$ e a partir da derivada da curva desse modelo foi possível encontrar os picos de tamanho médio característico para as amostras. Na Figura 25 são apresentadas as curvas características do modelo, assim como a sua derivada.

Figura 25 - Modelo de DoubleBoltzmann para a distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde (a) PMV_0 e (b) PMV_1 obtidos por CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A partir dos dados gerados pelo modelo, a Tabela 14 apresenta os valores médios de tamanho de partículas para as amostras. O modelo apresentou um bom ajuste aos dados com R^2 maiores que 0,96 e RMSE menores que 0,03. É possível observar que os pós obtidos apresentam uma distribuição com dois tamanhos de pó característicos, representados por X_{01} e X_{02} . Os valores médios de X_{01} foram de 7,917 e 7,969 μm e X_{02} de 23,253 e 24,537 μm para as amostras PMV_0 e PMV_1, respectivamente, não apresentando diferença significativa.

Tabela 14 - Parâmetros médios de distribuição do tamanho de partícula dos pós de milho verde obtidos por CTDC.

Pó	X_{01} (μm)	X_{02} (μm)	R^2	RMSE
PMV_0	7,917 \pm 0,108 ^a	23,253 \pm 1,454 ^a	0,9680	0,0295
PMV_1	7,969 \pm 0,034 ^a	24,537 \pm 0,361 ^a	0,9750	0,0280

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Marques et al. (2014b) avaliaram diferentes condições de processo na secagem de milho verde por *spray drying* variando a temperatura de secagem ($^{\circ}\text{C}$) e a concentração de

maltodextrina (% p/p) relataram tamanho de partícula dos pós variando entre 5,79 e 75,84 μm . Fitzpatrick et al. (2016) em um estudo comparativo de alimentos em pó comerciais, observou valores de tamanho de partícula para farinha de milho verde de 15 μm . Esses valores relatados na literatura corroboram entre os encontrados nesse estudo para pós secos por CTDC.

Com relação aos pós produzidos por CTDC, estes apresentaram uma distribuição bimodal. Essa característica de distribuição das partículas está relacionada diretamente ao processo de moagem. Nesse caso, o tamanho das partículas formadas é dependente do tempo e da velocidade das facas utilizadas e da característica do produto que está sendo moído. Se os produtos absorverem pequenas quantidades de umidade (caso que pode ocorrer em dias em que a umidade relativa ambiental está elevada), o processo de moagem é dificultado, produzindo partículas maiores (ZOTARELLI et al., 2017).

4.4.3 Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo

Os valores de densidade aparente, densidade real e porosidade dos pós de milho verde estão apresentados na Tabela 15. A porosidade é definida como a fração de vazios na amostra de pó, estando relacionada à densidade aparente (LEE; YOO, 2020). Pode-se observar que houve diferença significativa entre as amostras ($p \leq 0,05$) para todos os parâmetros apresentados. A amostra PMV_1 com menor densidade aparente apresentou porosidade significativamente maior do que a amostra PMV_0. Neste caso, o pré-tratamento térmico aplicado à amostra influenciou aumento da porosidade das partículas após a secagem.

Tabela 15 - Densidade aparente, densidade real e porosidade do leito fixo dos pós de milho verde obtidos por CTDC.

Pó	Densidade aparente (g/cm^3)	Densidade real (g/cm^3)	Porosidade (%)
PMV_0	$0,77 \pm 0,024^b$	$1,45 \pm 0,000^a$	$47 \pm 0,048^a$
PMV_1	$0,71 \pm 0,006^a$	$1,48 \pm 0,000^b$	$52 \pm 0,017^b$

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os valores observados para os pós de milho verde, estão dentro das faixas citadas por Barbosa-Cánovas et al. (2005), o qual relata que alimentos em pó possuem densidade aparente entre 0,3 e 0,8 g cm^{-3} e massa específica real próxima de 1,4 g.cm^{-3} . Marques et al. (2014b) na aplicação de maltodextrina para a produção de extrato de milho verde em pó obteve valores de densidade aparente entre 0,53 a 0,69 g.cm^{-3} com diferentes condições de processo. Zotarelli et al. (2017), na produção de pó de manga por CTD, reportou valores de densidade aparente,

densidade real e porosidade de $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$, $1,28 \text{ g.cm}^{-3}$ e 38%, respectivamente. É possível observar que os valores encontrados neste trabalho estão próximos aos relatados na literatura.

4.4.4 Solubilidade

Na Tabela 16 são mostrados os resultados de solubilidade dos pós obtidos pelo processo em CTDC.

Tabela 16 - Solubilidade dos pós de milho verde obtidos por CTDC.

Pó	Solubilidade (%)
PMV_0	$43,5 \pm 0,4^a$
PMV_1	$45,5 \pm 0,3^b$

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pode-se observar que houve um aumento significativo ($p \leq 0,05$) na solubilidade para a amostra PMV_1. Essa característica pode ser explicada pela quebra das fibras ocasionada pela ação do calor aplicado.

Marques et al. (2014b) na produção de milho verde em pó por *spray-drying*, relatou solubilidade de 83%, valores superiores aos encontrados nesse trabalho. A alta solubilidade pode ser explicada pela adição de maltodextrina no processo de secagem.

Alguns estudos indicam que o processo de secagem por *spray-drying* produz pós que podem apresentar valores maiores de solubilidade para um mesmo produto se comparado com os processos de *cast-tape drying*. Isso é explicado pela adição de agentes carreadores e pelo processo de quebra das fibras em pequenas partículas em função da elevada atomização no pulverizador (CAPARINO et al., 2012).

4.4.5 Cor

Na Figura 26 são apresentadas as fotografias das amostras de milho verde (polpa, pó e pó reconstituído). Os parâmetros da escala de cor CIELab (L^* , a^* , b^* e ΔE^*) das amostras de milho verde (polpa, pó e pó reconstituído), estão apresentados na Tabela 17.

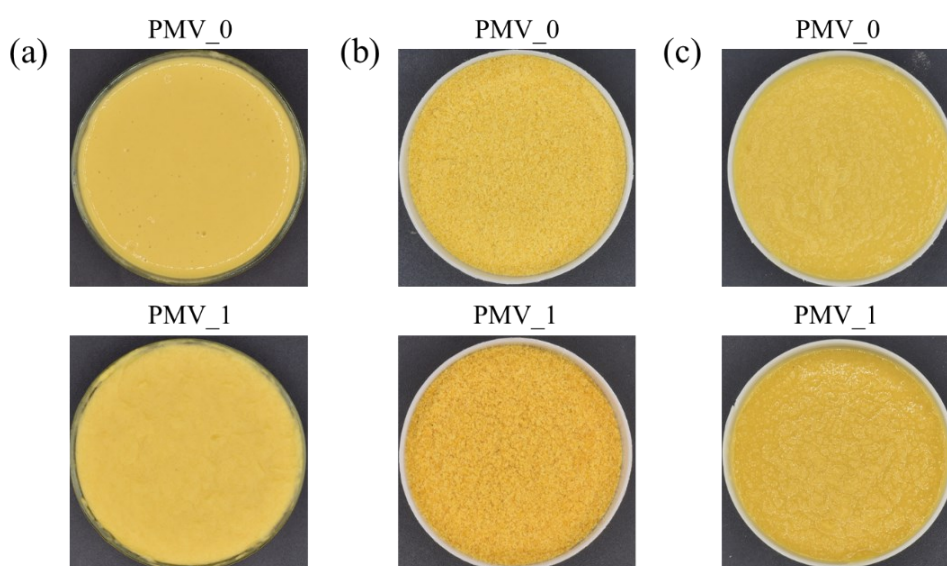
A cor é o principal atributo associado à qualidade dos alimentos e a mudança nos seus parâmetros são importante, pois influenciam os consumidores em sua aceitação (AHMED; RAMASWAMY, 2005).

Tabela 17 - Parâmetros de cor das amostras de milho verde obtidos por CTDC comparados com a polpa.

Amostras	Parâmetros				
	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	
Polpa	PMV_0	79,66 ± 0,16 ^a	0,89 ± 0,13 ^d	54,42 ± 0,09 ^b	-
	PMV_1	77,25 ± 0,59 ^b	1,83 ± 0,30 ^{cd}	55,28 ± 0,98 ^b	2,88 ± 0,42 ^c
Pó	PMV_0	77,73 ± 0,90 ^b	4,69 ± 0,68 ^b	58,07 ± 0,96 ^a	5,73 ± 0,62 ^b
	PMV_1	74,83 ± 0,36 ^c	7,15 ± 0,86 ^a	59,12 ± 0,55 ^a	9,23 ± 0,78 ^a
Pó reconstituído	PMV_0	75,35 ± 0,06 ^c	1,90 ± 0,14 ^{cd}	58,56 ± 1,02 ^a	6,10 ± 0,67 ^b
	PMV_1	72,85 ± 0,70 ^d	2,86 ± 0,34 ^c	54,34 ± 1,09 ^b	7,15 ± 0,61 ^b

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 26 - Imagens fotográficas representativas das amostras PMV_0 e PMV_1. (a) polpa, (b) pós e (c) pós reconstituídos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As amostras que sofreram o pré-tratamento térmico PMV_1 apresentaram uma coloração mais escura em comparação com as amostras PMV_0, apresentando diferença significativa ($p \leq 0,05$). Além disso, é possível observar que houve uma redução significativa na luminosidade (L^*) das amostras (pó e o pó reconstituído) após a secagem por CTD, quando comparada com a polpa. Durigon et al. (2016) também observou uma redução no parâmetro de luminosidade após a secagem de polpa de tomate por CTD.

A degradação de pigmentos é normalmente observada na diminuição de luminosidade, e pode estar relacionada a reações de escurecimento não enzimáticas ocorridas nas amostras, como por exemplo reações de Maillard (HASSAN; PAWELZIK; VON HOERSTEN, 2021).

Em relação ao parâmetro a^* analisando individualmente, as amostras de polpa, pó e pó reconstituído, apenas o pó apresentou diferença significativa entre as amostras PMV_0 e PMV_1. Houve uma mudança nesse parâmetro após o processo de secagem, no qual pode ser observado um aumento no seu valor indicando uma maior tonalidade da coloração vermelha. Após a reconstituição do pó esse parâmetro reduziu, apresentando valores de a^* semelhante a polpa inicial, não apresentando diferença significativa.

É possível observar que o parâmetro b^* aumentou após o processo de secagem, apresentando diferença significativa para as amostras PMV_0 e PMV_1 em relação a polpa. Após o processo de reidratação foi possível visualizar que apenas a amostra PMV_1 apresentou coloração semelhante à polpa, não apresentando diferença significativa, o que indica a intensidade de amarelo retornou a cor inicial após a reconstituição.

A diferença de cor (ΔE^*) foi utilizada para determinar a influência dos processos na mudança de cor em relação a polpa inicial (PMV_0), quanto maior seu valor, maior é o impacto dos processos na cor das amostras. O pré-tratamento térmico aplicado na amostra PMV_1 ocasionou uma pequena variação na cor em relação a polpa inicial, apresentando valor de $\Delta E^* = 2,88 \pm 0,42$.

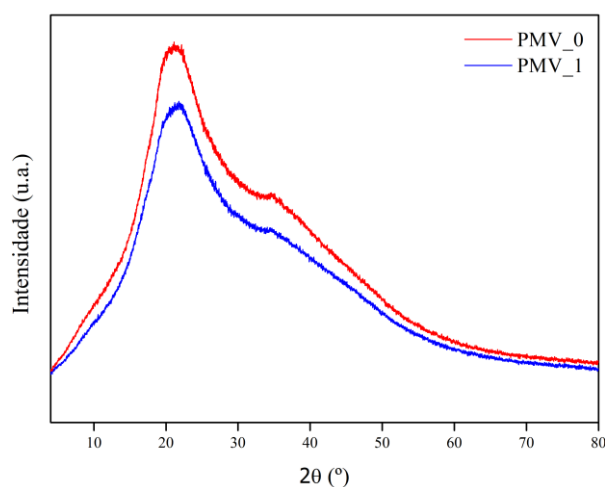
Para todas as amostras, o valor de (ΔE^*) foi relativamente baixo, o que implica que a secagem não teve um grande impacto na cor após os processos. Em relação ao pó, a amostra PMV_1 apresentou uma maior variação na cor, apresentando diferença significativa quando comparado com a PMV_0.

Após a reidratação, foi possível observar uma redução na variação de cor em relação à polpa inicial para a amostra PMV_1. Comparando a diferença de cor das amostras reconstituídas é possível observar que as amostras PMV_0 e PMV_1 não apresentaram diferença significativa entre si.

4.4.6 Difratomia de raios-X (DRX)

Os difratogramas de raios-X para as amostras de pós de milho verde estão apresentados na Figura 27. Para as amostras PMV_0 e PMV_1, foram encontrados picos característicos próximos a 23° e a 35° , indicando que o pré-tratamento aplicado antes da secagem não teve efeito sobre os padrões cristalinos das amostras.

Figura 27 - Difratomogramas de raios-X das amostras de pó de milho verde obtidas por CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As diferenças observadas estão relacionadas à intensidade relativa de difração. A intensidade do pico para a amostra PMV_1 é menor, no entanto, ambas apresentam o mesmo comportamento indicando que o padrão de difração entre elas foi semelhante. O pico de 23° já foi reportado em trabalhos encontrados na literatura, onde é característico para amostras que contém amido (SINGH; INOUCHI; NISHINARI, 2006).

Os alimentos ricos em amido diferem amplamente em cristalinidade e estrutura molecular. As zonas cristalinas do amido são compostas principalmente por amilopectina, enquanto as regiões amorfas são compostas por amilose (PARKER; RING, 2001). Os difratogramas de raios-X sugerem que as amostras se apresentam em estado semicristalinos e que porções maiores de moléculas eram amorfas.

A cristalinidade relativa dos pós de milho verde está apresentada na Tabela 18. As amostras PMV_0 e PMV_1 apresentaram valores de 23,9 e 26,7%, respectivamente. Peng e Yao (2018) no estudo comparativo de grânulos de diferentes tipos de amido, relatou valores de cristalinidade de 28% para amidos de milho doce.

Tabela 18 - Cristalinidade relativa (CR%) das amostras de pó de milho verde obtidas por CTDC.

Pó	Área Cristalina	Área amorfa	Área total	CR (%)
PMV_0	66871,3	212836,9	279708,2	23,9
PMV_1	62831,7	172403,1	235234,8	26,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

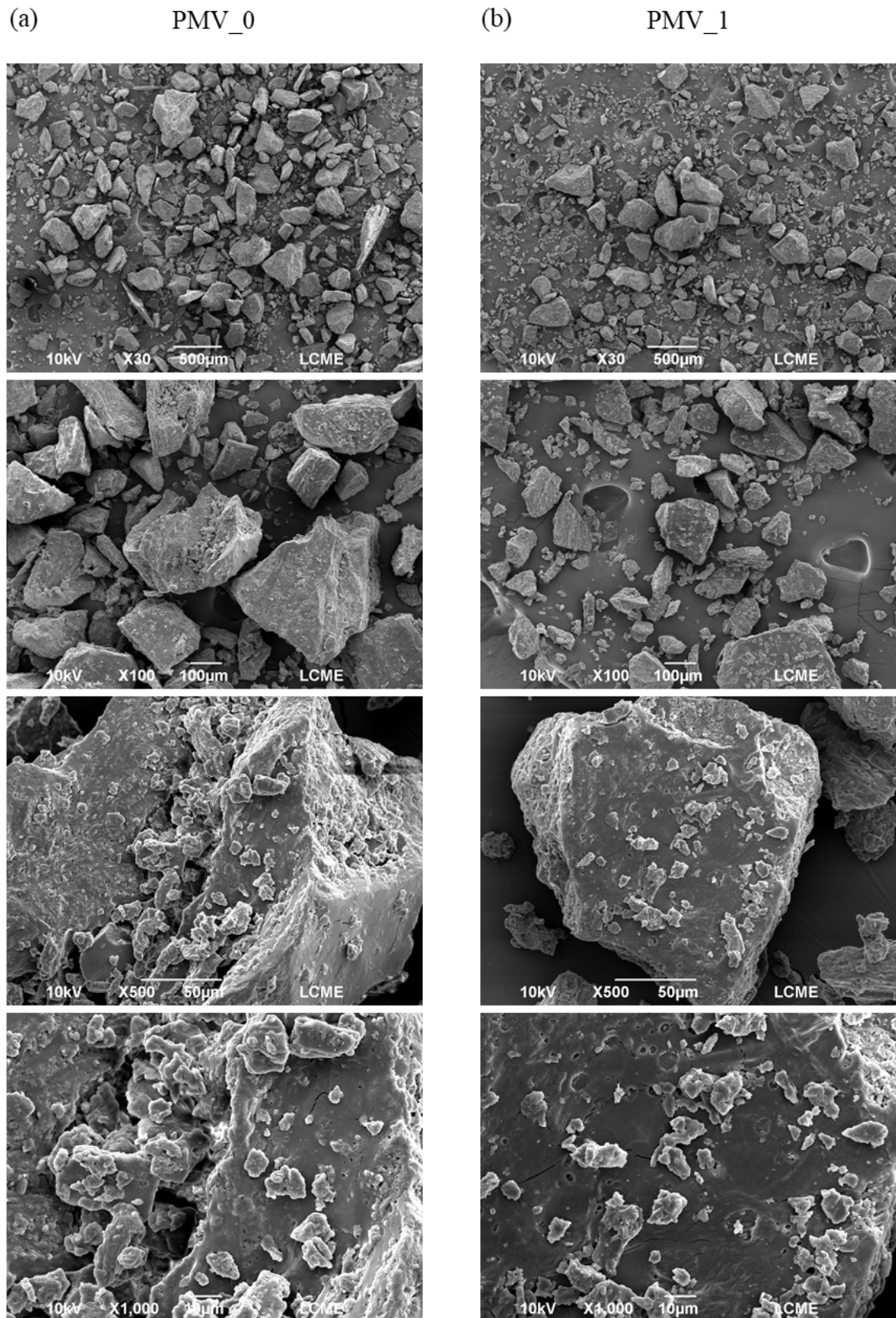
4.4.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 28 estão apresentadas as microscopias eletrônicas de varredura dos pós de milho verde obtidos por CTDC. As amostras foram submetidas a um processo de moagem após a secagem e pode-se observar que os pós apresentaram formatos irregulares, mas similares entre si. Entre os pós PMV_0 e PMV_1, pode-se observar que ambos apresentaram partículas levemente rugosas. A superfície predominantemente rugosa pode ser devido à absorção de umidade causada pela aglomeração do material e pode indicar uma junção entre as partículas. É evidente que as partículas possuem tamanhos não uniformes, essa característica pode ser explicada pelo tempo, velocidade e tipo de moagem.

Marques et al. (2014b) observou que partículas de milho verde produzidas por *spray drying* em diferentes condições experimentais exibiram características morfológicas com formação de partículas esféricas com superfície mais lisa e estrutura uniforme.

Segundo Nijdam e Langrish (2006), durante a atomização em temperaturas mais elevadas há um favorecimento na formação de partículas mais uniformes, pois a estrutura é formada mais rapidamente, evitando irregularidades na morfologia da partícula. Neste trabalho observou-se formato de partículas irregulares, devido à moagem, resultados semelhantes foram encontrados por Durigon et al. (2016) na produção de pó de tomate por *cast-tape drying* por CTDB.

Figura 28 - Microscopia eletrônica de varredura nas ampliações de 30, 100, 500 e 1000x para os pós obtidos através do processo de CTDC.

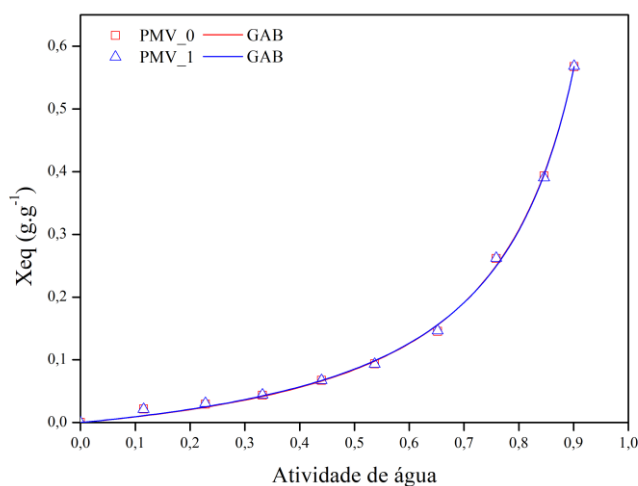


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.4.8 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de umidade dos pós de milho verde obtidos pelo processo CTDC e os ajustes do modelo de GAB aos dados experimentais são apresentados na Figura 29. As isotermas de sorção de umidade obtidas correspondem ao tipo III, segundo a classificação de Brunauer et al. (1940), que são típicas em alimentos com alto teor de sólidos solúveis. Um comportamento típico de produtos com alto teor de açúcar, onde ocorre um aumento lento no teor de umidade de equilíbrio em baixos valores de a_w e um aumento acentuado em valores de a_w próximos a 0,5 devido ao efeito predominante das interações soluto-solvente associadas à dissolução do açúcar (BHANDARI, 2013; MORAGA; MARTÍNEZ-NAVARRETE; CHIRALT, 2004; THYS et al., 2010).

Figura 29 - Curvas de isotermas de sorção de umidade com ajuste do modelo de GAB aos dados experimentais para os pós de milho verde produzidos por CTDC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Isotermas do tipo III foram reportadas por Samapundo et al. (2007) para grãos de milho amarelo e Marques et al. (2020) para farinha de milho fibrosa e da farinha de milho com glúten. Castoldi et al. (2015) observaram o mesmo comportamento para tomate em pó produzido por CTD. Os resultados encontrados nesse trabalho corroboram com os valores da literatura citados acima.

O conhecimento das características de sorção é essencial no que diz respeito à estabilidade no armazenamento e aceitabilidade de produtos alimentícios. O modelo de GAB é relatado na literatura como o que mais explica as isotermas de sorção de umidade de alimentos (BONOMI et al., 2012). De acordo com Oyelade et al. (2008), o modelo de GAB é adequado

para explicar o comportamento dos dados de sorção para produtos de milho, como a farinha de milho.

Tabela 19 - Parâmetros do modelo de GAB para os pós de milho verde produzidos por CTDC.

Pó	Parâmetros				
	X_m (b.s)	C	k	R^2	RMSE
PMV_0	0,1112	0,7743	0,9347	0,9984	0,0077
PMV_1	0,1059	0,8415	0,9396	0,9982	0,0080

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O modelo de GAB se ajustou bem aos dados experimentais, apresentando valores de $R^2 > 0,99$ e $RMSE \leq 0,008$ (Tabela 19). Portanto, o modelo GAB, além de apresentar boa correlação, pode ser utilizado para determinar a umidade na monocamada. De acordo com Labuza e Rahman (2007), a umidade da monocamada (X_m) indica a quantidade de água que está fortemente adsorvida no alimento, sendo um parâmetro importante para prever a estabilidade física e química dos produtos desidratados (AYRANCI; DUMAN, 2005). Os valores do teor de umidade da monocamada (X_m) estimados para os pós de milho verde ficaram próximos de $0,1 \text{ g.g}^{-1}$ (b.s), indicando que o pré-tratamento aplicado na amostra PMV_1 não influenciou na higroscopicidade dos pós. A umidade na monocamada garante a qualidade do alimento. Neste caso, deve estar inferior de $0,1 \text{ g.g}^{-1}$ (b.s), no qual as taxas de deterioração são mínimas. As constantes C e k estão relacionadas às energias de interação entre a primeira e outras moléculas nos sítios de adsorção individuais (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2002).

4.4.9 Parâmetros físico-químicos dos pós reconstituídos

Os parâmetros de umidade, atividade de água, pH e sólidos solúveis para as amostras reconstituídas em comparação com a polpa inicial estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização físico-química dos pós reconstituídos comparados com as polpas iniciais.

Amostra	X_{bs}	a_w	pH	Sólidos solúveis	
Polpa	PMV_0	$7,186 \pm 0,083^b$	$0,998 \pm 0,002^a$	$6,48 \pm 0,02^d$	$8,9 \pm 0,1^b$
	PMV_1	$7,064 \pm 0,075^b$	$0,997 \pm 0,003^a$	$6,34 \pm 0,02^c$	$7,9 \pm 0,1^a$
Pó reconstituído	PMV_0	$3,554 \pm 0,019^a$	$1,000 \pm 0,002^a$	$5,82 \pm 0,03^b$	$13,2 \pm 0,2^d$
	PMV_1	$3,673 \pm 0,014^a$	$0,999 \pm 0,002^a$	$5,72 \pm 0,02^a$	$12,6 \pm 0,3^c$

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pode-se observar na Tabela 22 uma redução significativa ($p \leq 0,05$) na umidade das amostras para o pó reconstituído em comparação com a polpa inicial. Tal efeito pode ser explicado pelo processo de reidratação, o qual necessita da influência da temperatura para a formação da pasta, visto que ocorre evaporação da água durante esse processo. Para a a_w , as amostras não diferiram estatisticamente, visto que a reconstituição não alterou esse parâmetro.

É possível observar que os valores de pH das amostras PMV_0 e PMV_1, reduziram significativamente após o processo de reconstituição do pó. De acordo com Kumar, Kachhadiya e Nayi (2020), a diminuição do pH pode estar associada à redução da umidade das amostras reidratadas, o que implica em um possível aumento na concentração de ácidos graxos e fosfatos. As amostras reidratadas apresentaram um aumento significativo no teor de sólidos solúveis em relação a polpa inicial. Esse fenômeno pode ser atribuído à perda de umidade na amostra em relação à polpa, uma vez que os sólidos solúveis se encontram em uma maior concentração devido ao menor conteúdo de água na amostra.

Alguns fatores como tempo de agitação e temperatura devem ser considerados na reconstituição dos pós, o que podem implicar em mudanças nas propriedades físico-químicas desses produtos (FITZPATRICK et al., 2016). Além disso, algumas propriedades importantes dos pós estão ligados diretamente ao comportamento na reidratação, nas quais incluem o tamanho de partícula, densidade, porosidade, solubilidade e morfologia (CAPARINO et al., 2012; FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

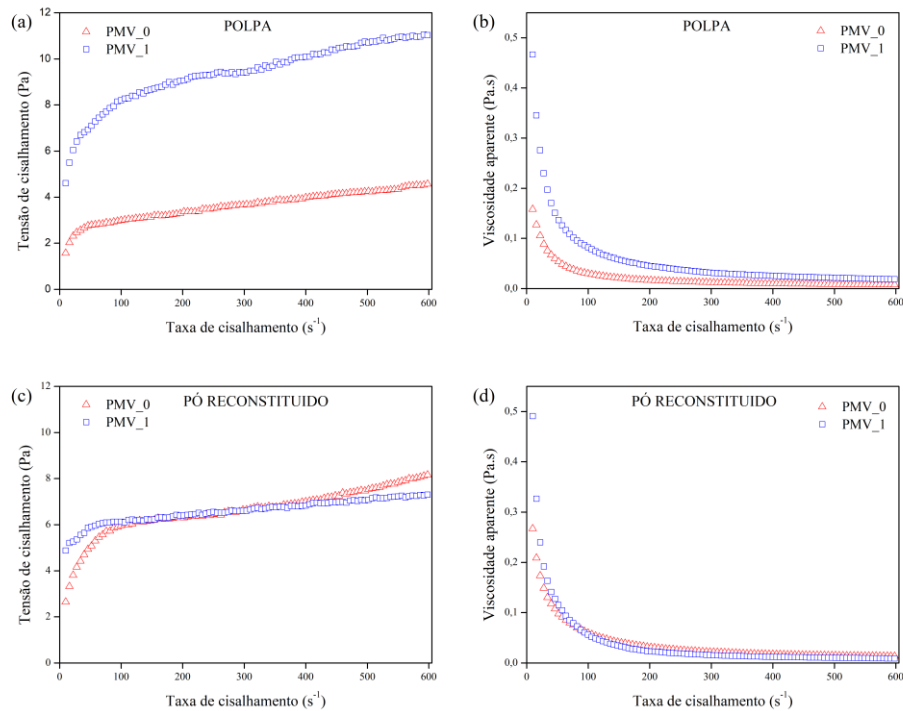
4.5 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

As curvas de escoamento são parâmetros importante no controle de qualidade para o processo industrial, principalmente para comparar as características gerais de produtos fabricados em diferentes linhas de produção (AHMED; RAMASWAMY, 2005).

Os comportamentos de fluxo dos pós reconstituídos em comparação com a polpa estão expostos na Figura 30. É possível observar que, inicialmente, a tensão de cisalhamento no pó reconstituído para a amostra PMV_1 é maior que para a amostra PMV_0, no entanto para o pó reconstituído ao decorrer do aumento da taxa de cisalhamento, a tensão para as amostras mantém um comportamento semelhante até atingir aproximadamente 400 s^{-1} (Figura 30c). Já em relação a polpa (Figura 30a) é possível observar que a amostra PMV_1 mantém uma tensão de cisalhamento superior a amostra PMV_0 durante todo o processo.

Com relação à viscosidade aparente, a amostra PMV_1 para o pó reconstituído apresenta comportamento semelhante em relação a polpa (Figura 30b e 30d), o que indicou uma maior consistência em relação as amostras PMV_0.

Figura 30 - Curvas de tensão de cisalhamento vs taxa de cisalhamento para a polpa (a) e pó reconstituído (c) e viscosidade aparente vs taxa de cisalhamento para a polpa (b) e pó reconstituído (d).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para fluidos não-newtoniano, as inclinações das curvas de escoamento diminuem com o aumento da taxa de deformação, evidenciando assim, um decréscimo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação (MA et al., 2019). Comportamento semelhante aos observados por Dutta et al. (2006) em purê de abóbora e Vandresen et al. (2009) em suco de cenoura pasteurizado.

Os parâmetros que descrevem o comportamento reológico para os pós reconstituídos comparados com a polpa estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros reológicos do modelo de Ostwald e as viscosidades aparentes na taxa de cisalhamento de 9 s^{-1} dos pós reconstituídos comparados com as amostras iniciais.

Amostra	$K \text{ (Pa.s}^n)$	n	$\eta_{ap} \text{ (Pa.s)}(9 \text{ s}^{-1})$	R^2
Polpa	PMV_0 $1,099 \pm 0,217^a$	$0,217 \pm 0,028^b$	$0,196 \pm 0,026^a$	0,969
	PMV_1 $3,530 \pm 0,373^c$	$0,177 \pm 0,018^b$	$0,578 \pm 0,038^c$	0,984
Pó reconstituído	PMV_0 $2,924 \pm 0,352^b$	$0,192 \pm 0,029^b$	$0,387 \pm 0,035^b$	0,958
	PMV_1 $4,216 \pm 0,368^c$	$0,081 \pm 0,018^a$	$0,558 \pm 0,026^c$	0,962

*Letras diferentes na coluna representam diferenças significativas entre as amostras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O modelo de Ostwald se ajustou bem aos dados experimentais, apresentando valores de R^2 superiores a 0,95. O índice de consistência (k) para as amostras PMV_0 e PMV_1 do pó reconstituído, quando comparadas com a polpa, aumentou significativamente, indicando que a pasta formada possui elevada resistência estrutural.

O índice de comportamento de fluxo de $n < 1$ exibiu que a estrutura da pasta é quebrada pela tensão de cisalhamento aplicada, o que indica que as propriedades da pasta apresenta comportamento pseudoplástico (CHAN et al., 2011). O mesmo comportamento foi encontrado em estudos anteriores realizados com polpa de manga (VIDAL; GASPARETTO, 2000), polpa de goiaba (FERREIRA, 2009) e polpa de abacaxi (PELEGRINE; VIDAL; GASPARETTO, 2000).

A viscosidade aparente aumentou significativamente para amostra PMV_0, comparando com o pó reconstituído em relação à polpa inicial. Já para a amostra PMV_1 não houve diferença significativa entre esse parâmetro. De acordo com Buffo, Reineccius e Oehlert (2001), a viscosidade aparente depende da concentração, do tamanho e da forma das moléculas em suspensão, das oscilações entre as ligações formadas e do número de colisões intra e intermoleculares. O aumento da viscosidade aparente da pasta de milho verde formada quando comparado com a polpa de milho verde inicial indica uma maior interação entre os componentes dos grânulos quando hidratado. Esta característica foi observada por Karim et al. (2007) no estudo do processo de gelatinização de amido de batata.

A pasta de milho verde formada pela reconstituição do pó apresenta partículas de diferentes formas e volumes. A interação do pó no líquido pode ocasionar aglomeração das partículas, causando maior viscosidade quando comparada com a polpa de milho verde inicial (MARQUES et al., 2014b). Comportamento que foi observado para amostra PMV_0. Para a formação da pasta foi relatado por Sandhu et al. (2004) que o poder de expansão do amido depende da capacidade de retenção de água das moléculas de amido por ligações de hidrogênio. As ligações de hidrogênio que estabilizam a estrutura das hélices duplas nos cristalitos são quebradas durante a gelatinização e são substituídas pelas ligações de hidrogênio com a água, e o inchamento é regulado pela cristalinidade do amido (LI et al., 2016; ZHOU et al., 2017).

5 CONCLUSÃO

De acordo com os objetivos propostos e os resultados expostos é possível concluir que:

- As curvas de secagem apresentam um comportamento não linear para ambos os processos CTDB e CTDC, e que o modelo matemático de Midilli pode representá-las com bom ajuste;

- O pré-tratamento térmico aplicado na amostra aumentou o tempo de secagem, no entanto as amostras chegaram à umidade e atividades de água que garantem a estabilidade dos produtos obtidos. Além disso, o pré-tratamento térmico teve uma influência significativa nas propriedades físico-químicas dos pós obtidos, implicando no aumento da solubilidade, porosidade e diminuição no tempo de dispersão das partículas;

- Não houve diferença considerável nos parâmetros de cor para os pós e os pós reconstituídos em relação a amostra inicial, apresentando baixos valores de ΔE^* ;

- Os pós reconstituídos apresentaram comportamento de fluido pseudoplástico, de acordo com produtos formados a base de milho, como purês, cremes;

- A produção de milho verde desidratado em pó por CTDC é possível. Para sua conservação, é necessário que o produto seja acondicionado em embalagens de alta barreira para evitar ganho de água;

A secagem por *cast-tape drying* é uma alternativa viável e tecnologicamente competitiva para a produção pó de milho verde desidratado em um curto período.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar diferentes condições de processo na secagem de polpa de milho verde e avaliar o efeito desses parâmetros nas propriedades físico-químicas dos pós obtidos;
- Avaliar os custos energéticos e de produção de milho verde em pó pelo processo *cast-tape drying*;
- Estudar um sistema de secagem que permita aplicação de vácuo, a fim de aumentar as taxas de secagem e reduzir as temperaturas do processo;
- No processo de secagem por *cast-tape drying* o primeiro produto que se obtêm na secagem da polpa de milho verde é um filme, que é moído para a obtenção do pó. Esse filme é comestível, sendo um produto alternativo ao pó. Estudos para o seu uso na culinária são necessários para compreender as exigências relativas à sua resistência mecânica e estabilidade física e química;
- Aplicar o pó de milho verde como ingrediente de outros produtos como purês e cremes de milho verde e avaliar a estabilidade e a biodisponibilidade dos nutrientes de interesse nestes produtos;
- Avaliar a aceitabilidade das pastas formadas pela reconstituição do milho verde em pó através de análise sensorial utilizando formulações culinárias definidas.

REFERÊNCIAS

- ABONYI, B. I. et al. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 3, p. 1051–1056, 2002.
- AHMED, J.; RAMASWAMY, H. S. Effect of Temperature on Dynamic Rheology and Colour Degradation Kinetics of Date Paste. **Food and Bioproducts Processing**, v. 83, n. 3, p. 198–202, 2005.
- AKPINAR, E. K.; TORAMAN, S. Determination of drying kinetics and convective heat transfer coefficients of ginger slices. **Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 10, p. 2271–2281, 2016.
- AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Food and Bioproducts Processing**, v. 80, n. 2, p. 118–128, 2002.
- ALBATICI, R. et al. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 33–40, 2013.
- AYRANCI, E.; DUMAN, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isolate at 10, 20 and 30°C. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 1, p. 83–91, 2005.
- AZEVEDO, P. F. DE. Comercialização de produtos agroindustriais. **Gestão agroindustrial**, v. 3, p. 64–112, 2001.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V et al. **Food powders: physical properties, processing, and functionality**. 1. ed. New York: Springer, 2005. v. 86
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V et al. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. 1. ed. Iowa: Blackwell Publishing, 2007.
- BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A Cultura do Milho**. Évora - PT: Universidade de Évora - Departamento de Fitotecnia, 2014.
- BEMILLER, J. N. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**. 3rd. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018.
- BEMILLER, J. N. Corn Starch Modification. In: **Corn**. 3rd. ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 537–549.
- BHANDARI, B. Introduction to food powders. In: **Handbook of Food Powders**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. p. 1–25.
- BHANDARI, B.; HOWES, T. Relating the Stickiness Property of Foods Undergoing Drying and Dried Products to their Surface Energetics. **Drying Technology: An International Journal**, v. 23, 1 abr. 2005.
- BILIADERIS, C. G.; MAURICE, T. J.; VOSE, J. R. Starch gelatinization phenomena studied by differential scanning calorimetry. **Journal of food science**, v. 45, n. 6, p. 1669–1674, 1980.
- BONOMI, F. et al. Structure–quality relationship in commercial pasta: A molecular glimpse. **Food Chemistry**, v. 135, n. 2, p. 348–355, 2012.

- BOONYAI, P.; BHANDARI, B.; HOWES, T. Stickiness measurement techniques for food powders: a review. **Powder Technology**, v. 145, n. 1, p. 34–46, 2004.
- 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, 1940.
- BRUNAUER, S. The Adsorption of Gases and Vapors. **Physical adsorption**, v. 1, 1945.
- BUFFO, R. A.; REINECCIUS, G. A.; OEHLERT, G. W. Factors affecting the emulsifying and rheological properties of gum acacia in beverage emulsions. **Food Hydrocolloids**, v. 15, n. 1, p. 53–66, 2001.
- CAPARINO, O. A. et al. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 1, p. 135–148, 2012.
- CÁRDENAS-PÉREZ, S. et al. Evaluation of the ripening stages of apple (Golden Delicious) by means of computer vision system. **Biosystems Engineering**, v. 159, p. 46–58, 2017.
- CASTILLO-GIRONÉS, S. et al. Impact of osmotic dehydration and different drying methods on the texture and sensory characteristic of sweet corn kernels. **Food Processing and Preservation**, n. February, p. 1–14, 2021.
- CASTOLDI, M. et al. Production of Tomato Powder by Refractance Window Drying. **Drying Technology**, v. 33, p. 1463–1473, 2015.
- CHAN, H. et al. Molecular structure, rheological and thermal characteristics of ozone-oxidized starch. **Food Chemistry**, v. 126, n. 3, p. 1019–1024, 2011.
- CHEN, B.; O’MAHONY, J. A. Impact of glucose polymer chain length on heat and physical stability of milk protein-carbohydrate nutritional beverages. **Food chemistry**, v. 211, p. 474–482, nov. 2016.
- CHEN, X. D.; ÖZKAN, N. Stickiness, functionality, and microstructure of food powders. **Drying Technology**, v. 25, n. 6, p. 959–969, 2007.
- CRISTINA DUARTE MARQUES, R. et al. Modeling sorption properties of maize by-products obtained using the Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) method. **Food Bioscience**, v. 38, p. 100738, 2020.
- CROWLEY, S. V et al. Rehydration characteristics of milk protein concentrate powders. **Journal of Food Engineering**, v. 149, p. 105–113, 2015.
- CUQ, B.; RONDET, E.; ABECASSIS, J. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities. **Powder Technology**, v. 208, n. 2, p. 244–251, 2011.
- DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Experimental study and optimization of the agglomeration of acerola powder in a conical fluid bed. **Powder Technology**, v. 188, n. 3, p. 187–194, 2009.
- DACANAL, G. CESAR. **Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leite fluidizado**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2005.
- DAVOODI, M. G. et al. Effect of different pre-treatments and dehydration methods on quality characteristics and storage stability of tomato powder. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 10, p. 1832–1840, 2007.

DE MORAES, J. O. et al. Scale-up of the production of cassava starch based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 4, p. 800–808, 2013.

DE SOUZA, P. G. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇAÍ (Euterpe oleracea Mart.) DESIDRATADO EM PÓ POR CAST-TAPE DRYING**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 2015.

DENG, H. et al. Effects of enzyme treatments and drying methods on gelatinization and retrogradation of instant rice porridge. **Food Science and Technology Research**, v. 18, n. 3, p. 341–349, 2012.

DURIGON, A. et al. Cast-tape drying of tomato juice for the production of powdered tomato. **Food and Bioproducts Processing**, v. 100, p. 145–155, 2016.

DUTTA, D. et al. Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 4, p. 538–546, 2006.

EK, K. L.; BRAND-MILLER, J.; COPELAND, L. Glycemic effect of potatoes. **Food Chemistry**, v. 133, n. 4, p. 1230–1240, 2012.

ELIASSON, A.-C.; GUDMUNDSSON, M. Starch: Physicochemical and functional aspects. In: **Carbohydrates in Food**. 2nd. ed. New York: Taylor & Francis, 2006. p. 391–469.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 20 mar. 2021

FAO. **Food Agriculture and Organization - Maize** Food Agriculture and Organization, 2020. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/maize/en/>>. Acesso em: 24 out. 2020

FELIX DA SILVA, D. et al. Reconstitution behavior of cheese powders: Effects of cheese age and dairy ingredients on wettability, dispersibility and total rehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 270, p. 109763, 2020.

FELLOWS, P. J. **Food processing technology: principles and practice**. 3rd. ed. Washington, DC: Elsevier, 2009.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática**. 4th. ed. São Paulo: Artmed Editora, 2018.

FENNEMA, O. R. **Food Chemistry, Third Edition**. 3. ed. New York: Taylor & Francis, 1996.

FITZPATRICK, J. J. et al. Investigation of the rehydration behaviour of food powders by comparing the behaviour of twelve powders with different properties. **Powder Technology**, v. 297, p. 340–348, 2016.

FITZPATRICK, J. J.; AHRNÉ, L. Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 209–214, 2005.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder Technology**, v. 206, n. 1, p. 72–78, 2011.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1982.

- FRABETTI, A. C. C.; DURIGON, A.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying of guava pulp by cast-tape drying. **LWT**, v. 96, p. 620–626, 2018.
- GARCÍA-SEGOVIA, P.; ANDRÉS-BELLO, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J. Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 2, p. 480–488, 2011.
- GEANKOPOLIS, C. J. **Transport processes and separation process principles (includes unit operations)**. 4th. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- GIANNETTI, V.; BOCCACCI MARIANI, M.; COLICCHIA, S. Furosine as marker of quality in dried durum wheat pasta: Impact of heat treatment on food quality and security – A review. **Food Control**, v. 125, p. 108036, 2021.
- GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. The effect on product recovery. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 1, p. 25–34, 2005.
- GRABOWSKI, J. A.; TRUONG, V. D.; DAUBERT, C. Spray-Drying of Amylase Hydrolyzed Sweetpotato Puree and Physicochemical Properties of Powder. **Journal of Food Science**, v. 71, p. E209–E217, 1 jun. 2006.
- HAMAKER, B. R.; TUNCIL, Y. E.; SHEN, X. Carbohydrates of the Kernel. In: **Corn**. 3rd. ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 305–318.
- HE, R. et al. Effect of drying treatment on the structural characterizations and physicochemical properties of starch from canistel (*Lucuma nervosa* A.DC). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 167, p. 539–546, 2021.
- HICKEY, A.; GIOVAGNOLI, S. Powder and Particle-Dependent Traditional Manufacturing Processes (Unit Operations). In: **Pharmaceutical Powder and Particles**. 1st. ed. Cham: Springer, 2018. p. 61–71.
- HOGEKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of food powders. **Food Science and Technology International**, v. 9, n. 3, p. 223–235, 2003.
- HUANG, T.-T. et al. Effect of debranching and heat-moisture treatments on structural characteristics and digestibility of sweet potato starch. **Food Chemistry**, v. 187, p. 218–224, 2015.
- JANE, J. Structural Features of Starch Granules II. In: **Starch**. 3rd. ed. San Diego: Academic Press, 2009. p. 193–236.
- JIVAN, M. J.; MADADLOU, A.; YARMAND, M. An attempt to cast light into starch nanocrystals preparation and cross-linking. **Food Chemistry**, v. 141, n. 3, p. 1661–1666, 2013.
- JUNQUEIRA, J. R. DE J. et al. Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. **LWT - Food Science and Technology**, v. 82, p. 404–410, 2017.
- KARIM, A. A. et al. Effects of Phosphorus Contents on the Gelatinization and Retrogradation of Potato Starch. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 2, p. C132–C138, 1 mar. 2007.
- KASHANINEJAD, M. et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98–108, 2007.

KAYS, S. J.; OTHERS. **Postharvest physiology and handling of perishable plant products**. 1st. ed. New York: Van Nostrand Reinhold Inc., 1991.

KLANG, J. M. et al. Effect of bleaching and variety on the physico-chemical, functional and rheological properties of three new Irish potatoes (Cipira, Pamela and Dosa) flours grown in the locality of Dschang (West region of Cameroon). **Heliyon**, v. 5, n. 12, p. e02982, 2019.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. 2nd. ed. New York: CRC press, 2009.

KUMAR, N.; KACHHADIYA, S.; NAYI, P. Storage stability and characterization of biochemical, rehydration and colour characteristics of dehydrated sweet corn kernels. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101619, 2020.

LABUZA, T.; ALTUNAKAR, L. Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms. In: **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. 2nd. ed. Chicago: John Wiley & Sons, Inc., 2020. p. 161–205.

LABUZA, T.; RAHMAN, M. S. Water activity and food preservation. In: **Handbook of food preservation**. 2nd. ed. New York: CRC press, 2007. p. 447–476.

LEE, H.; YOO, B. Agglomerated xanthan gum powder used as a food thickener: Effect of sugar binders on physical, microstructural, and rheological properties. **Powder Technology**, v. 362, p. 301–306, 2020.

LEME, A. C. **Avaliação e armazenamento de híbridos de milho verde visando à produção de pamonha**. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado, 2007.

LI, W. et al. Retrogradation behavior of corn starch treated with 1,4- α -glucan branching enzyme. **Food Chemistry**, v. 203, p. 308–313, 2016.

LIU, W. et al. A novel strategy for improving drying efficiency and quality of cream mushroom soup based on microwave pre-gelatinization and infrared freeze-drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 66, p. 102516, 2020.

LLAVATA, B. et al. Innovative pre-treatments to enhance food drying: a current review. **Current Opinion in Food Science**, v. 35, p. 20–26, 2020.

MA, Y.-S. et al. Evaluation studies on effects of pectin with different concentrations on the pasting, rheological and digestibility properties of corn starch. **Food Chemistry**, v. 274, p. 319–323, 2019.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Aspectos Fisiológicos do Milho para o Consumo Verde. In: **O cultivo do milho verde**. 1. ed. Sete Lagoas: Embrapa, 2003. v. 1p. 49–66.

MALUMBA, P. et al. Comparative study of the effect of drying temperatures and heat-moisture treatment on the physicochemical and functional properties of corn starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 3, p. 633–641, 2010.

MAPA. **Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Brasil fecha safra 2018/2019 com recorde de 242,1 milhões de toneladas de grãos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-fecha-safra-2018-2019-com-recorde-de-242-1-milhoes-de-toneladas-de-graos>>. Acesso em: 24 out. 2020.

MARQUES, G. R. et al. Spray Drying of Green Corn Pulp. **Drying Technology**, v. 32, n. 7, p. 861–868, 2014a.

MARQUES, G. R. et al. Application of maltodextrin in green corn extract powder production. **Powder Technology**, v. 263, p. 89–95, 2014b.

MENGES, H. O.; ERTEKIN, C. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 15, p. 2337–2348, 2006.

MENON, A.; STOJCESKA, V.; TASSOU, S. A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies. **Trends in Food Science & Technology**, v. 100, p. 67–76, 2020.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A NEW MODEL FOR SINGLE-LAYER DRYING. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 23 jul. 2002.

MITCHELL, W. R. et al. Mapping the rate-limiting regimes of food powder reconstitution in a standard mixing vessel. **Powder Technology**, v. 270, p. 520–527, 2015.

MOKHTAR, S. M.; SWAILAM, H. M.; EMBABY, H. E.-S. Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. **Food Chemistry**, v. 248, p. 1–7, 2018.

MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N.; CHIRALT, A. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: influence of pretreatment. **Journal of Food Engineering**, v. 62, n. 4, p. 315–321, 2004.

NINDO, C. et al. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, p. 117–136, 2007.

NINDO, C. I. et al. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, n. 2, p. 117–136, 2003.

ONG, X. Y.; TAYLOR, S. E.; RAMAIOLI, M. Rehydration of food powders: Interplay between physical properties and process conditions. **Powder Technology**, v. 371, p. 142–153, 2020.

ORIKASA, T. et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, v. 125, p. 51–58, 1 mar. 2014.

OYELADE, O. J. et al. Modelling moisture sorption isotherms for maize flour. **Journal of Stored Products Research**, v. 44, n. 2, p. 179–185, 2008.

PAES, M. C. D. **Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

PALIWAL, R. L. et al. **Tropical maize: improvement and production**. 1st. ed. México: CAB direct, 2000.

PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. 1st. ed. Campinas: Unicamp, 2007.

PARKER, R.; RING, S. G. Aspects of the Physical Chemistry of Starch. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p. 1–17, 2001.

PAVAN, M. A.; SCHMIDT, S. J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (*Euterpe oleracea* Martius) juice. **LWT - Food Science and Technology**, v. 48, n. 1, p. 75–81, 2012.

- PENG, X.; YAO, Y. Small-granule starches from sweet corn and cow cockle: Physical properties and amylopectin branching pattern. **Food Hydrocolloids**, v. 74, p. 349–357, 2018.
- PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C.; GAMA, E. E. G. Cultivares de milho para o consumo verde. In: **O Cultivo do Milho Verde**. 1st. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. p. 17–30.
- PERERA, C. et al. Comparison of physicochemical properties and structures of sugary-2 cornstarch with normal and waxy cultivars. **Cereal Chemistry**, v. 78, n. 3, p. 249–256, 2001.
- PÉREZ, S.; BALDWIN, P. M.; GALLANT, D. J. Structural Features of Starch Granules I. In: **Starch**. 3rd. ed. San Diego: Academic Press, 2009. p. 149–192.
- POZUETA-ROMERO, J.; PERATA, P.; AKAZAWA, T. Sucrose-starch conversion in heterotrophic tissues of plants. **Critical reviews in plant sciences**, v. 18, n. 4, p. 489–525, 1999.
- QUEK, S. Y.; CHOK, N. K.; SWEDLUND, P. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 46, n. 5, p. 386–392, 2007.
- RAHMAN, M. S.; PERERA, C. O. Drying and food preservation. In: **Handbook of food preservation**. 2nd. ed. New York: CRC press, 2007. p. 403–432.
- RAMACHANDRAIAH, K.; CHIN, K. B. Evaluation of ball-milling time on the physicochemical and antioxidant properties of persimmon by-products powder. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 37, p. 115–124, 2016.
- RAO, M. A. Flow and functional models for rheological properties of fluid foods. In: **Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications**. 2. ed. [s.l.] Springer, 2007. p. 27–58.
- RATTI, C. **Advances in food dehydration**. 1st. ed. New York: CRC Press, 2009.
- ROSENTHAL, A.; SGARBIERI, V. C. Nutritional evaluation of a fresh sweet corn drum drying process. **Drying**, v. 92, p. 1419–1425, 1992.
- RUAN, Z. et al. Corn. In: **Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products**. 1st. ed. London: Academic Press, 2019. p. 59–72.
- SAHIN, S.; SUMNU, S. G. **Physical properties of foods**. New York: Springer, 2006.
- SAMAPUNDO, S. et al. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 168–175, 2007.
- SANDHU, K. S.; SINGH, N.; KAUR, M. Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological, and rheological properties of starches. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 1, p. 119–127, 2004.
- SAWAZAKI, E.; POMMER, C. V.; ISHIMURA, I. Avaliação de cultivares de milho para utilização no estágio de verde. **Ciencia e cultura-Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciencia**, v. 31, n. 11, p. 1297–1302, 1979.
- SERNA-SALDIVAR, S. O. **Cereal grains: properties, processing, and nutritional attributes**. 1st. ed. New York: CRC press, 2010.
- SERNA-SALDIVAR, S. O.; CARRILLO, E. P. Food uses of whole corn and dry-milled

fractions SERNA-SALDIVAR, S. O.; CARRILLO, E. P. Food uses of whole corn and dry-milled fractions. In: *Corn*. 3rd. ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 435–467. In: **Corn**. 3rd. ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2019. p. 435–467.

SIMÃO, R. DA S. et al. Production of mango leathers by cast-tape drying: Product characteristics and sensory evaluation. **LWT**, v. 99, p. 445–452, 2019.

SINGH, N.; INOUCHI, N.; NISHINARI, K. Structural, thermal and viscoelastic characteristics of starches separated from normal, sugary and waxy maize. **Food Hydrocolloids**, v. 20, n. 6, p. 923–935, 2006.

SINGH, N.; SINGH, S.; SHEVKANI, K. Maize: Composition, Bioactive Constituents, and Unleavened Bread. In: **Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention**. 2nd. ed. London: Academic Press, 2019. p. 111–121.

SOUZA, P. G. DE. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AÇAÍ (Euterpe oleracea Mart.) DESIDRATADO EM PÓ POR CAST-TAPE DRYING**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado, 2015.

THYS, R. C. S. et al. Adsorption isotherms of pinhão (*Araucaria angustifolia* seeds) starch and thermodynamic analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 3, p. 468–473, 2010.

TONTUL, I.; EROĞLU, E.; TOPUZ, A. Convective and refractance window drying of cornelian cherry pulp: Effect on physicochemical properties. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 8, p. e12917, 2018.

TROLLER, J. A.; CHRISTIAN, J. H. B. **Water activity and food**. 1st. ed. San Francisco: Academic Press, 2012.

USDA. **FoodData Central of U.S. Department of agriculture. Agricultural Research Service**. Disponível em: <<https://fdc.nal.usda.gov/index.html>>. Acesso em: 28 out. 2020.

VANDRESEN, S. et al. Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 3, p. 269–274, 2009.

VARNALIS, A.; BRENNAN, J.; MACDOUGALL, D. Proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering - J FOOD ENG**, v. 48, p. 361–367, 1 jun. 2001.

VEGA-MERCADO, H.; MARCELA GÓNGORA-NIETO, M.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 271–289, 2001.

WATERSCHOOT, J. et al. Starch blends and their physicochemical properties. **Starch-Stärke**, v. 67, n. 1–2, p. 1–13, 2015.

WATSON, E. L. et al. Dehydrated Sweet Corn Quality. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 12, n. 1, p. 1–6, 1979.

XIE, F. et al. Effects of tamarind seed polysaccharide on gelatinization, rheological, and structural properties of corn starch with different amylose/amylopectin ratios. **Food Hydrocolloids**, v. 105, p. 105854, 2020.

ZHAO, X. et al. Effect of superfine grinding on properties of ginger powder. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 2, p. 217–222, 2009.

ZHOU, D.-N. et al. Effects of oligosaccharides on pasting, thermal and rheological properties of sweet potato starch. **Food Chemistry**, v. 230, p. 516–523, 2017.

ZOTARELLI, M. F. et al. Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. **Powder Technology**, v. 305, p. 447–454, 2017.

ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, v. 69, p. 410–417, 2015.