



**HELENA MARA ALVES BORGES**

**EFEITOS DA TEMPERATURA E ESPESSURA DA CAMADA  
DE ESPUMA NA PRODUÇÃO DE COUVE EM PÓ**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**HELENA MARA ALVES BORGES**

**EFEITOS DA TEMPERATURA E ESPESSURA DA CAMADA  
DE ESPUMA NA PRODUÇÃO DE COUVE EM PÓ**

Monografia apresentada à Universidade  
Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia  
Química, para a obtenção do título de  
Bacharel.

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa  
Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2021**

**HELENA MARA ALVES BORGES**

**EFEITOS DA TEMPERATURA E ESPESSURA DA CAMADA DE ESPUMA NA  
PRODUÇÃO DE COUVE EM PÓ**

**EFFECTS OF TEMPERATURE AND FOAM LAYER THICKNESS ON COLLARD  
GREENS' POWDER PRODUCTION**

Monografia apresentada à Universidade  
Federal de Lavras, como parte das  
exigências do Curso de Engenharia  
Química, para a obtenção do título de  
Bacharel.

APROVADA em 22 de fevereiro de 2021.

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa – UFLA

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél – UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior – UFLA

---

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa

Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2021**

*À minha mãe, Jussara, pelo apoio, amizade e amor incondicionais.*

*À minha avó, Nilma, por todo cuidado e carinho.*

*Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar e me dar forças em todas as etapas da minha vida.

Aos meus pais, Jussara e Celso, por todo o esforço que fizeram para que eu pudesse alcançar todas as vitórias que conquistei, em especial, a graduação. Sou imensamente grata pelo amor, amizade e apoio incondicional.

Ao meu irmão, Guilherme, e minha prima, Ariane, pela amizade verdadeira e por não medirem esforços para me encorajar e me fazer sorrir.

Ao Igor, pelo amor e companheirismo. Por estar ao meu lado, me escutar, aconselhar e ser a pessoa com quem sempre posso contar.

A Bianca, pelos anos de amizade verdadeira, em especial, durante a graduação. Ter você ao meu lado durante os melhores e piores momentos foi imprescindível para chegar até aqui.

A Renata, por acreditar no meu potencial e me orientar, pela paciência e pelos ensinamentos durante estes anos.

Ao corpo docente de Engenharia Química, composto por profissionais incríveis. Sou imensamente grata a todo conhecimento passado e por serem mais que professores; verdadeiros mestres.

Aos demais docentes e técnicos da Universidade Federal de Lavras, pelos ensinamentos e auxílio durante a graduação.

A Universidade Federal de Lavras, por oferecer a oportunidade de uma educação de excelência, que não forma apenas profissionais, mas cidadãos conscientes.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência”*

*(Henry Ford)*

## RESUMO

O desperdício de alimentos é uma preocupação mundial, vistos os significativos impactos na saúde humana e na economia. A perda de alimentos acontece, entre outros motivos, pela degradação durante etapas de manuseio e processamento e pelo mau aproveitamento durante o consumo. Uma maneira de combater o desperdício é aproveitar integralmente o alimento, evitando o descarte de partes nutritivas que geralmente não são incorporadas nas refeições – como cascas, sementes, talos, entre outros. É o caso da couve (*Brassica oleracea var. acephala*), vegetal rico em nutrientes, cujos talos são frequentemente descartados. O elevado conteúdo de umidade também contribui consideravelmente para o problema pois é um dos principais fatores de degradação de produtos biológicos. Logo, outra alternativa é a preservação de alimentos através da secagem, visto que, ao reduzir seu conteúdo de umidade, minimiza-se a degradação química, enzimática e/ou microbiológica. A secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) apresenta diversas vantagens, como a simplicidade, rapidez, baixo custo, capacidade de reter nutrientes e compostos voláteis e pela boa qualidade do produto obtido. Visto isso, este trabalho tem como objetivo estudar a secagem de talos e folhas de couve em leito de espuma sob diferentes condições de temperatura do ar de secagem e espessura de camada fina, analisar propriedades físico-químicas e *bulk* dos pós e verificar a influência das condições do processo nas propriedades finais desses materiais. Os talos e folhas de couve foram higienizados, misturados com água destilada (1:1 m/m) e transformados em uma polpa com o auxílio de um liquidificador. Posteriormente, a polpa foi transformada em espuma ao adicionar agentes espumantes – Emustab<sup>®</sup> e albumina em pó – sob diferentes concentrações mássicas (2,5, 5 e 10%) e agitar a mistura em batedeira doméstica por 10 minutos. A formulação com 2,5% de Emustab<sup>®</sup> foi selecionada para dar continuidade aos experimentos, pois apresentou menor densidade (0,145 g/mL). A secagem foi realizada sob diferentes espessuras de camada fina (0,5, 1,0 e 1,5 cm) e temperaturas do ar de secagem (50, 70 e 90 °C). Para todas as condições, o modelo matemático de Midilli foi o que melhor descreveu o processo ( $R^2 \geq 0,994$  e  $SQR \leq 0,013$ ) e o mecanismo convectivo foi predominante. Em relação aos pós, a maioria apresentou umidade abaixo do limite estabelecido em legislação (12%), variando de 4,77 a 18,89% em base seca. Foi observada considerável diferença total de cor dos pós com relação à espuma, entre 16,22 e 19,76, boa razão de reidratação – entre 7,29 e 7,76 – baixos valores de densidade da partícula, *bulk* aerada e compactada – variando de 0,902 a 1,17 g/cm<sup>3</sup>, 0,0925 a 0,116 g/cm<sup>3</sup> e 0,129 a 0,167 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, e alta porosidade *bulk*, entre 83,45 e 88,83%. Com base nos valores de razão de Hausner e índice de Carr, os pós desidratados foram classificados com escoabilidade ruim a aceitável. Através de um planejamento fatorial do tipo 3<sup>2</sup>, foi investigado o efeito das diferentes condições experimentais sob a umidade, diferença total de cor, densidade da partícula e razão de reidratação e concluiu-se que apenas as duas primeiras sofreram influência significativa ( $p > 0,05$ ). A condição experimental ótima obtida é a de 50°C e 1,5cm, que gera pós com umidade final e diferença total de cor de, respectivamente, 5,25%, e 18,01.

**Palavras-chave:** Secagem em Camada de Espuma. *Brassica oleracea var. acephala*. Planejamento Fatorial.

## ABSTRACT

Food waste is a worldwide concern, given the significant impacts on human health and economy. The loss of food occurs, among other reasons, due to degradation during handling and processing stages and poor use during consumption. One way to combat waste is through the full use of food, avoiding the disposal of nutritious parts that are not usually incorporated in meals - such as peels, seeds, stems, among others. This is the case of collard greens (*Brassica oleracea* var. *Acephala*), a vegetable rich in nutrients, whose stems are often discarded. The high moisture content also contributes considerably to the problem as it is one of the main factors of degradation of biological products. Therefore, another alternative is the preservation of food through drying, since, by reducing its moisture content, chemical, enzymatic and / or microbiological degradation are minimized. The foam mat drying has several advantages, such as simplicity, speed, low cost, ability to retain nutrients and volatile compounds and the good quality of the product obtained. In view of this, this work aims to study the drying of collard greens stems and leaves in a foam layer under different conditions of drying air temperature and thin layer thickness, to analyze the physical, chemical and bulk properties of the powders and to verify the influence of process conditions on the final properties of these materials. The collard greens stems and leaves were cleaned, mixed with distilled water (1: 1 m / m) and transformed into a pulp with a blender. Subsequently, the pulp was transformed into foam by adding foaming agents - Emustab<sup>®</sup> and powdered albumin - under different mass concentrations (2.5, 5 and 10%) and stir the mixture in a domestic mixer for 10 minutes. The formulation with 2.5% Emustab<sup>®</sup> was selected to continue the experiments, as it showed lower density (0.145 g/mL). The drying was carried out under different thicknesses of thin layer (0.5, 1.0 and 1.5 cm) and drying air temperatures (50, 70 and 90 °C). For all conditions, the Midilli mathematical model was the one that best described the process ( $R^2 \geq 0.994$  and  $SQR \leq 0.013$ ) and the convective mechanism was predominant. In relation to the powders, the majority presented humidity below the limit established in legislation (12%), varying from 4.77 to 18.89% on a dry basis. There was a considerable total difference in the color of the powders in relation to the foam, between 16.22 and 19.76, a good rehydration ratio - between 7.29 and 7.76 - low values of particle density, aerated and compacted bulk - varying from 0.902 to 1.17 g/cm<sup>3</sup>, 0.0925 to 0.116 g/cm<sup>3</sup> and 0.129 to 0.167 g/cm<sup>3</sup>, respectively, and high bulk porosity, between 83.45 and 88.83%. Based on Hausner ratio values and Carr index, dehydrated powders were classified as having poor and acceptable flowability. Through a 3<sup>2</sup> factorial design, the effect of the different experimental conditions on humidity, total color difference, particle density and rehydration ratio was investigated and it was concluded that only the first two suffered significant influence ( $p > 0.05$ ). The optimum experimental condition obtained is that of 50°C and 1.5 cm, which generates powders with final moisture and total color variation of, respectively, 5.25%, and 18.01.

**Palavras-chave:** Foam Mat Drying. *Brassica oleracea* var. *acephala*. Factorial Design.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1.	Couve.....	12
2.2.	Secagem.....	13
2.2.1.	Secagem em camada de espuma.....	15
2.3.	Análise estatística.....	17
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1.	Materiais.....	19
3.2.	Obtenção da polpa e espuma.....	19
3.3.	Caracterização da polpa e espuma.....	20
3.4.	Ensaio de secagem.....	22
3.5.	Caracterização do produto seco.....	24
3.5.1.	Umidade final.....	24
3.5.2.	Diferença total de cor.....	24
3.5.3.	Densidade da partícula, propriedades <i>bulk</i> e escoabilidade.....	24
3.5.4.	Razão de reidratação.....	27
3.5.5.	Análise estatística.....	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1.	Polpa e espuma.....	30
4.2.	Secagem.....	33
4.3.	Propriedades do produto seco.....	36
4.3.1.	Umidade final.....	36
4.3.2.	Densidade da partícula.....	39
4.3.3.	Cor.....	40
4.3.4.	Razão de reidratação.....	43
4.3.5.	Propriedades <i>bulk</i> e escoabilidade.....	43
4.3.6.	Desejabilidade e condições operacionais ótimas.....	45
5.	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48
	APÊNDICE A.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

O desperdício alimentar é uma realidade mundial preocupante: a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura estima que até um terço dos alimentos produzidos para consumo humano são perdidos durante etapas de produção, pós-colheita armazenamento e transporte ou, ainda, desperdiçados pelo descarte indevido (FAO, 2021). Portanto, é extremamente importante desenvolver maneiras que minimizem esse cenário.

A secagem é uma alternativa para solucionar grande parte do problema uma vez que, ao diminuir o conteúdo de umidade dos alimentos, as reações que provocam a degradação química, enzimática e/ou microbiológica são minimizadas, prolongando a vida útil do alimento. A secagem em camada de espuma (*foam mat drying*) é uma técnica que consiste em transformar um alimento em estado líquido ou semilíquido em uma espuma estável e submetê-la à desidratação sob ar aquecido. Em adição à redução do conteúdo de umidade, esta técnica apresenta diversas vantagens como rapidez, baixo custo e simplicidade quando comparada a outros métodos, além de preservar características do alimento e gerar produtos com propriedades desejáveis (HARDY; JIDEANI, 2017).

Outra maneira de evitar o desperdício é através do consumo integral, incluindo às refeições partes não convencionais dos alimentos, como talos, caules, sementes, ramas, entre outras. A couve (*Brassica oleracea var. acephala*), por exemplo, é um vegetal altamente nutritivo e muito consumido no Brasil, porém, em muitas preparações seus talos são indevidamente descartados.

Portanto, este estudo tem como objetivo estudar a secagem de folhas e talos de couve em camada de espuma e avaliar a influência da variação da temperatura do ar e espessura de camada fina nas características finais dos pós. Estes pós poderão ser, posteriormente, incorporados em diferentes preparações, aumentando o valor nutricional das refeições e diminuindo o desperdício deste alimento.

Nesse sentido, deseja-se obter inicialmente uma espuma adequada para a secagem em camada fina, em termos de densidade, expansão e estabilidade e avaliar o comportamento da secagem do alimento, identificando, ainda, o modelo matemático que melhor descreve o processo. Propriedades dos pós de couve desidratados nas diferentes condições avaliadas, como umidade, densidade da partícula, densidade *bulk* aerada e compactada, porosidade *bulk*, cor e razão de reidratação, serão medidas e os pós serão classificados quanto à sua escoabilidade. Além disso, por meio de uma análise estatística, deseja-se obter a correlação que descreve a

influência da variação dos parâmetros em algumas propriedades avaliadas e encontrar as condições ótimas para o processo de acordo com as características desejáveis aos produtos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Couve

A couve (*Brassica oleraceae* var. *acephala*) é um vegetal de folha rico em nutrientes, de baixa caloria e que pertence à família *Brassicaceae* (BANJAC et al., 2019). Composta por 4060 espécies de mais de 370 gêneros, esta família representa uma cultura economicamente importante, sendo amplamente consumida em todo o mundo. Os vegetais da família *Brassicaceae* são fonte de antioxidantes e apresentam diversos nutrientes e compostos fitoquímicos, como glicosinolatos, compostos fenólicos, antocianinas, carotenoides e vitaminas (JEON et al., 2018). Devido a presença de tais componentes, evidencia-se a importância da *Brassicaceae* no tratamento de doenças crônicas, como obesidade, diabetes tipo 2, doenças cardiovasculares, câncer e osteoporose. Por fim, ainda se destaca sua atividade antioxidante e antimicrobiana (FAVELA-GONZÁLEZ; HERNÁNDEZ-ALMANZA; DE LA FUENTE-SALCIDO, 2020).

Sabe-se que espécies de *Brassica oleraceae* contêm carotenoides, vitaminas, isotiocianatos, glicosinolatos, compostos fenólicos, polifenóis e antocianinas e, portanto, apresentam ação antioxidante, anti-úlceras e anticarcinogênica (KANG et al., 2018).

A couve faz parte do grupo *Acephala*, uma vez que não forma ‘cabeça’. É um dos mais nutritivos vegetais *Brassica*, pois é uma excelente fonte de vitaminas, minerais, fibras alimentares insolúveis e carotenoides. Em comparação a outras hortaliças folhosas, a couve se destaca por apresentar maior teor de proteínas, carboidratos, fibras, ferro, cálcio, luteína, beta caroteno e vitaminas A, C e B<sub>3</sub>. Dentre seus principais benefícios à saúde, pode-se citar a prevenção ao câncer e à osteoporose (BANJAC et al., 2019; NOVO; PRELA-PANTANO; DEUBER, 2011).

Esta hortaliça é amplamente consumida no Brasil e faz parte da culinária nacional, de acordo com o Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2017, a produção nacional anual deste alimento foi 161.986 toneladas. A couve é utilizada em sua forma *in natura* para a preparação de diversos pratos típicos, no entanto, em muitas preparações, seus talos são habitualmente descartados. Esses talos são fonte de fibras e lipídeos e, assim, o uso da couve em sua forma integral, poderia elevar o valor nutricional de preparações, além de evitar o desperdício do alimento (STORCK et al., 2013). Além do uso *in natura*, as folhas de couve em sua forma integral (incluindo o talo) podem ser utilizadas como ingrediente para o desenvolvimento de muitos produtos alimentícios, tais como sucos, sopas, tortas, massas,

dentre diversas outras aplicações, exigindo, no entanto, sua desidratação com o intuito de aumentar a vida útil e formar estoques reguladores de mercado.

## 2.2. Secagem

A secagem é um importante processo para a preservação de alimentos e consiste na remoção térmica de substâncias voláteis, geralmente umidade, para produzir um produto seco (MUJUMDAR, 2006). Como consequência da significativa redução do conteúdo de umidade, minimiza-se a degradação microbiana e reações químicas e/ou enzimáticas que deterioram o produto, o que aumenta sua estabilidade e validade. Além disso, o material seco apresenta considerável redução de seu peso e volume, o que reduz os custos com embalagem, armazenamento e transporte (SANGAMITHRA et al., 2015).

No processo de secagem ocorrem simultaneamente os processos de transferência de calor e de massa. O primeiro ocorre de uma corrente de ar aquecido para o material, fazendo com que sua umidade superficial evapore. Já a transferência de massa ocorre com a movimentação da umidade do interior do material em direção à sua superfície, que será então evaporada, sendo o vapor de água removido pelo agente de secagem (ar aquecido). Diversas variáveis influenciam o processo de secagem: a transferência de calor, por exemplo, depende da temperatura, umidade, velocidade e pressão do ar de secagem e área exposta disponível para a evaporação, enquanto a transferência de massa é influenciada pela natureza física, temperatura e umidade do material (MUJUMDAR, 2014).

Conhecer a cinética de secagem dos alimentos é importante pois permite a previsão de resultados e a otimização dos parâmetros. Os modelos matemáticos de secagem são capazes de descrever a cinética do processo e são utilizados para projetar ou melhorar sistemas, bem como para o controle de processos. Em alguns casos, também podem fornecer informações a respeito da umidade e temperatura do material, além dos perfis de velocidade e pressão de um alimento fluido e/ou do fluido de secagem. Os modelos matemáticos de secagem em camada fina são os mais utilizados dentre os propostos para a secagem de alimentos uma vez que são capazes de descrever o processo de maneira unificada, independentemente de seu mecanismo de controle (FRANCO et al., 2017).

A Tabela 1 apresenta alguns modelos de secagem em camada fina (Equações 1 a 5) nos quais a o adimensional de razão de umidade (*Moisture Ratio* – MR) é obtido como função do tempo de secagem (t) e dos parâmetros de cada modelo (a, b, k e n).

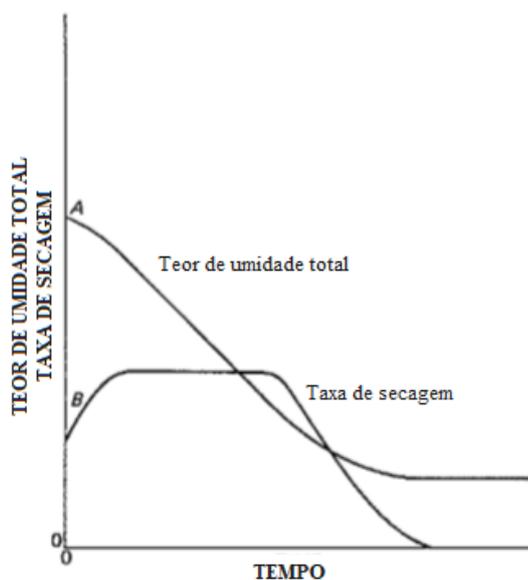
Tabela 1 – Modelos matemáticos de secagem em camada fina

Modelo	Equação	
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	(1)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(2)
Henderson e Pabis	$MR = a \exp(-kt^n)$	(3)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(4)
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	(5)

Fonte: Adaptado de Lima e Ferreira (2011).

Experimentalmente, o teor de umidade e a taxa de secagem podem ser calculados a partir de valores de massa de material aferidos no decorrer do processo de secagem. Quando estes resultados são observados em função do tempo, são obtidas curvas como as apresentadas pela Figura 1.

Figura 1 – Curvas típicas de teor de umidade total e taxa de secagem vs. tempo de secagem.



Fonte: Adaptado de McCabe, Smith e Harriott (1993).

A curva “A” apresentado na Figura 1 ilustra a relação entre o teor de umidade do material e o tempo de secagem. Inicialmente, há um curto período de estabilização necessário para que o material alcance a temperatura de vaporização. A partir de então, o conteúdo de umidade decresce com o passar do tempo até que, finalmente, alcança um valor de umidade constante (umidade de equilíbrio).

A curva “B” da Figura 1, por sua vez, representa a taxa de secagem no decorrer do processo. Após o período de ‘ajuste’ da temperatura, a taxa de secagem assume um valor constante independente do teor de umidade do material, o que configura o ‘período de taxa constante’. Nele, o material encontra-se tão úmido que existe um filme de água em toda a superfície de secagem e esse líquido evapora em decorrência dos fenômenos de transferência de calor e de massa que ocorrem na superfície. Em sólidos porosos, a maior parte da água removida durante este período é proveniente de seu interior, portanto, ele se estende enquanto a reposição de água do interior para a superfície do material for suficiente para mantê-la completamente úmida. Quando o material alcança o ‘ponto crítico’, o gráfico se curva para baixo e dá origem ao ‘período de taxa decrescente’. Nesta etapa, a água superficial é insuficiente para manter um filme contínuo em toda a área de secagem, em outras palavras, a velocidade de reposição da água passa a ser menor que a velocidade de evaporação superficial, então, as condições internas do material passam a controlar o processo. Os valores de taxa de secagem diminuem continuamente até que, eventualmente, a taxa torna-se nula e isto ocorre quando o material atinge sua umidade de equilíbrio (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 1993).

Apesar da redução do conteúdo de umidade do alimento ser o principal objetivo da desidratação, este não é o único efeito que a secagem acarreta ao produto. Aroma, sabor e textura podem ser alterados devido à ocorrência de reações químicas e bioquímicas (ALBINI; FREIRE; FREIRE, 2019). O alimento pode, por exemplo, se tornar mais escuro se submetido à desidratação sob altas temperaturas, devido ao escurecimento enzimático e não enzimático (reações de Maillard). Podem, também, ocorrer alterações na microestrutura e distribuição dos componentes, o que influencia a reconstituição e a maneira com que o alimento pode ser incorporado a outros ingredientes. Portanto, parâmetros físicos, químicos e bioquímicos como porosidade, solubilidade, capacidade de hidratação, perda de vitaminas, escurecimento e degradação de componentes nutracêuticos podem ser utilizados para avaliar a qualidade do alimento desidratado (FRANCO et al., 2016).

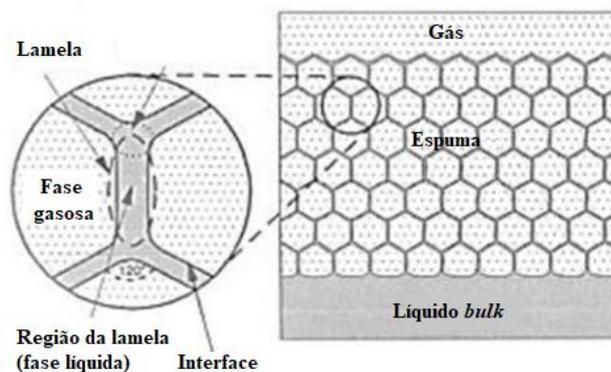
### **2.2.1. Secagem em camada de espuma**

A secagem em camada de espuma é uma técnica simples que consiste em transformar um material líquido ou semilíquido em uma espuma estável através da incorporação de ar ou outros gases, normalmente na presença de agentes espumantes. A espuma é, então, seca em ar quente até o ponto em que as reações químicas e/ou enzimáticas e o crescimento de microrganismos são minimizadas (FRANCO et al., 2017).

É uma técnica recomendada para a secagem de substâncias viscosas, sensíveis ao calor e/ou com alto teor de açúcar, podendo, portanto, ser utilizada para a desidratação de sucos, leite, frutas, bebidas, geleias, dentre outros. Devido à estrutura da espuma, a secagem é rápida e pode ser realizada em temperatura relativamente baixa, o que torna o processo mais simples e econômico que outros métodos de secagem, além de preservar os compostos voláteis presentes no material. Como consequência, obtém-se um produto de alta qualidade, fácil reidratação, com densidade controlada, leve, poroso e que apresenta grande estabilidade quando embalado (HARDY; JIDEANI, 2017).

A espuma é uma dispersão coloidal composta por duas fases – dispersa (interna) e contínua (externa) – separadas por um filme líquido chamado lamela, como ilustra a Figura 2. A fase dispersa é o gás, o qual é incorporado ao líquido (fase contínua) na forma de pequenas bolhas. Espumas de alimentos e bebidas são mais complexas, pois são formadas por gases, líquidos, sólidos e surfactantes (HARDY; JIDEANI, 2017; SANGAMITHRA et al., 2015).

Figura 2 – Estrutura de uma espuma (2D)



Fonte: Adaptado de Hardy e Jideani (2017).

Apesar da transferência de calor ser prejudicada devido à grande quantidade de ar no interior da espuma, o aumento da interface gás-líquido eleva a taxa de transferência de massa, o que reduz o tempo necessário para a desidratação e aumenta a qualidade do produto seco (DEHGHANNYA et al., 2018a). A secagem rápida pode ser explicada pela movimentação da umidade do interior à superfície do material através da difusão por capilaridade nos filmes líquidos que envolvem as bolhas, ademais, a estrutura porosa facilita a secagem das camadas internas da espuma (RAJKUMAR et al., 2007). É evidente, então, a necessidade da espuma se manter estável e preservar sua estrutura durante o processo. Espumas instáveis, além de

dificultarem a secagem, geram produtos com cor, textura, sabor e valor nutritivo inferiores (BAG; SRIVASTAV; MISHRA, 2011).

A estabilidade da espuma é determinada pela resistência mecânica da lamela e pelas propriedades da interface ar-líquido, fato que comprova a importância dos agentes espumantes. Além de facilitarem a formação da espuma, esses materiais surfactantes são capazes de se adsorverem na interface ar-líquido, reduzir a tensão interfacial e formar um filme viscoelástico coeso e forte que resiste à temperatura e agitação mecânica (SANGAMITHRA et al., 2015).

O Emustab<sup>®</sup> é um agente espumante à base de água, estabilizantes (monoglicerídeos de ácidos graxos destilados e sal de ácidos graxos) e emulsificantes (monoesterato de sorbitana e polioxietileno de monoesterato de sorbitana). Algumas vantagens desse aditivo são o baixo custo e a facilidade de incorporá-lo a substâncias líquidas ou semilíquidas, uma vez que se apresenta em forma de pasta. É possível encontrar na literatura, trabalhos diversos que se dedicam a avaliar o uso deste aditivo, geralmente em concentrações de até 10%, na obtenção de espumas de diferentes alimentos, visando a secagem em camada fina. Fernandes (2010), De Lisboa, De Figueirêdo e Queiroz (2012) e Pinto (2012), por exemplo, utilizaram o Emustab<sup>®</sup> para obtenção de espumas de polpa de cajá, figo-da-índia e pequi, respectivamente.

Outro agente espumante largamente utilizado na produção de espumas visando a secagem *foam mat* é a albumina (RAJKUMAR et al., 2007; THUWAPANICHAYANAN; PRACHAYAWARAKORN; SOPONRONNARIT, 2008). Dentre suas principais funcionalidades está sua capacidade de formar e estabilizar espumas, uma vez que as proteínas presentes na albumina agem como um emulsificante anfifílico entre as fases dispersa e contínua, e geralmente é adicionada em concentrações mássicas de até 20% (HARDY; JIDEANI, 2017).

Sabe-se que a temperatura do ar de secagem e a espessura da camada de espuma influenciam tanto o processo quanto as características do produto obtido. Neste contexto, existem na literatura trabalhos que estudam tais influências no processo de desidratação de diversos alimentos, tais como polpa de cajá (DE FREITAS et al., 2018), suco de limão (DEHGHANNYA et al., 2018b) e purê de camarão (HAMZEH et al., 2019). Porém, não foram encontrados estudos que tratam dos impactos dessas variáveis na secagem em camada de espuma de folhas e talos de couve, bem como nas propriedades dos pós obtidos.

### **2.3. Análise estatística**

É de extrema importância, em qualquer processo, identificar as variáveis envolvidas e compreender sua influência no produto e no desempenho do processo pois, assim, é possível encontrar as condições ótimas de operação de acordo com o resultado que se deseja obter.

Um planejamento experimental é um conjunto de ensaios estabelecido com base em critérios científicos e estatísticos, cuja finalidade é determinar a influência de variáveis nos resultados de um sistema ou processo estudado (BUTTON, 2005).

A respeito do desenvolvimento e/ou melhoria do desempenho de processos, as técnicas de planejamento de experimentos com base estatística são bastante úteis e, portanto, são essenciais para a engenharia. O planejamento experimental associado à análise de superfícies de respostas é uma ferramenta que permite determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um processo e, por consequência, diminuir a variação, melhorar a concordância entre os valores obtidos e pretendidos, reduzir o tempo do processo bem como o seu custo operacional e aumentar o rendimento (CALADO, 2003). Visto isso, os experimentos planejados estatisticamente são utilizados em projetos de engenharia para avaliar e comparar configurações básicas do projeto, avaliar diferentes materiais, selecionar parâmetros de projeto e, por fim, determinar os parâmetros-chave do projeto de produtos que afetam o desempenho do produto. Os experimentos fatoriais são utilizados quando há diversos fatores de interesse em um experimento (MONTGOMERY, 2009).

Em um planejamento fatorial do tipo  $3^k$ , são analisados três níveis – baixo (-1), médio (0) e alto (+1) – de “k” fatores. É um planejamento utilizado em situações nas quais se objetiva detectar curvatura na função de resposta (CALADO, 2003). O modelo de regressão é obtido pelo uso da Equação 6, em que Z é a resposta,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$  são coeficientes, X e Y são os fatores – ou variáveis independentes.

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{12} XY + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 \quad (6)$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

As folhas de couve foram adquiridas de um produtor rural da cidade de Lavras (MG), no mês de outubro de 2019. O vegetal apresentava limbo orbicular com pecíolo e nervura com coloração verde levemente arroxeada. O ápice da folha apresentava formato arredondado e emarginado, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 – Folhas de couve *in natura* utilizadas no experimento.



Fonte: Do autor (2021).

O alimento foi higienizado com solução aquosa de hipoclorito de sódio, de acordo com as especificações do fabricante para a higienização de frutas e verduras. Em seguida, o material foi armazenado em sacos plásticos e sob refrigeração a aproximadamente 4°C. Os agentes espumantes Emustab<sup>®</sup> (Selecta) e albumina em pó (Asa Powder) – apresentados, respectivamente, nas Figuras 4(c) e 4(d) – também foram adquiridos em Lavras (MG), no comércio local e armazenados em ambiente seco e arejado.

#### 3.2. Obtenção da polpa e espuma

As folhas e talos de couve foram processados com água destilada em um liquidificador, mantendo a proporção mássica dessa mistura de 1:1, aproximadamente. A polpa obtida foi armazenada em sacos plásticos e congelada para uso posterior.

Para a obtenção de uma espuma estável e de densidade adequada para a secagem em camada fina, os emulsificantes albumina (10% m/m) e Emustab<sup>®</sup> (10, 5 e 2,5% m/m) foram adicionados à polpa em diferentes concentrações mássicas. Essas misturas foram submetidas à agitação durante 10 minutos com o auxílio de uma batedeira, com velocidade de rotação de aproximadamente 975 rpm. A Figura 4 apresenta um esquema com os procedimentos descritos.

Figura 4 – Folhas e talos de couve *in natura* (a); polpa (b); emulsificante Emustab<sup>®</sup> (c); albumina em pó (d); espuma à base de Emustab<sup>®</sup> (e) e à base de albumina em pó (f).



Fonte: Do autor (2021).

### 3.3. Caracterização da polpa e espuma

A densidade da polpa e das espumas foi determinada por picnometria utilizando um picnômetro de 50 mL previamente calibrado com água destilada. O picnômetro foi inicialmente preenchido com a polpa e a massa deste conjunto foi aferida em uma balança eletrônica modelo *BL-6200AS-BI* (Figura 5.a). Substituindo-se os valores de massa da amostra ( $m$ ) e volume do picnômetro ( $V$ ) na Equação 7, obteve-se a densidade ( $\rho$ ) da polpa.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

O mesmo procedimento foi realizado para a determinação da densidade das espumas à base de Emustab<sup>®</sup> e albumina, e todas as medidas foram realizadas em triplicata.

Conhecendo-se a densidade da polpa ( $\rho_{polpa}$ ) e das espumas ( $\rho_{espuma}$ ), a expansão das mesmas foi calculada de acordo com a Equação 8.

$$Expansão (\%) = \frac{\frac{1}{\rho_{espuma}} - \frac{1}{\rho_{polpa}}}{\frac{1}{\rho_{polpa}}} * 100 \quad (8)$$

A formulação com menor densidade de espuma foi selecionada para dar continuidade aos experimentos a seguir.

A estabilidade da espuma foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Barmore (1934), com adaptações. Uma peneira contendo 10g de espuma foi apoiada sobre um funil de vidro que se encontrava sob uma proveta (Figura 5.b). Este conjunto permaneceu por 2h em uma estufa de convecção forçada de ar (modelo *SL-102*) e, para as temperaturas de 50, 70 e 90°C, verificou-se o volume de espuma coalescido ( $V_{coalescido}$ ) no interior da proveta. Com estes valores e a densidade da espuma, a estabilidade foi calculada utilizando-se a Equação 9.

$$Estabilidade (\%) = \left( 1 - \frac{V_{coalescido} * \rho_{espuma}}{10} \right) * 100 \quad (9)$$

O pH dos materiais foi determinado usando um pHmetro digital modelo LUCA-210 (Figura 5.c). A avaliação da cor foi determinada por colorimetria utilizando-se um colorímetro *Minolta* modelo CM-5 e escala *HunterLab* (Figura 5.d). Os parâmetros  $L^*$  (representa a luminosidade, variando de 0 a 100),  $a^*$  (define a transição entre o vermelho (+) e o verde (-)) e  $b^*$  (define a transição entre o amarelo (+) e o azul (-)) foram determinados usando a escala CIELAB  $L^*$ , sendo as medidas realizadas em triplicata. A diferença total – ou variação global – de cor entre a polpa e a espuma ( $\Delta E$ ) foi calculada através da Equação 10:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (10)$$

A viscosidade da espuma foi obtida através de um viscosímetro de Brookfield modelo *Digital Rotary Viscometer Viscosity NDJ-5S*, que submetia o fluido a diferentes taxas de deformação ao rotacionar o *spindle* número 4 a 6, 12, 30 e 60 rpm (Figura 5.e).

A Figura 5 ilustra todos os experimentos realizados para a caracterização da polpa e da espuma.

Figura 5 – Experimento para determinação da densidade (a), estabilidade (b), pH (c), cor (d) e viscosidade (e).

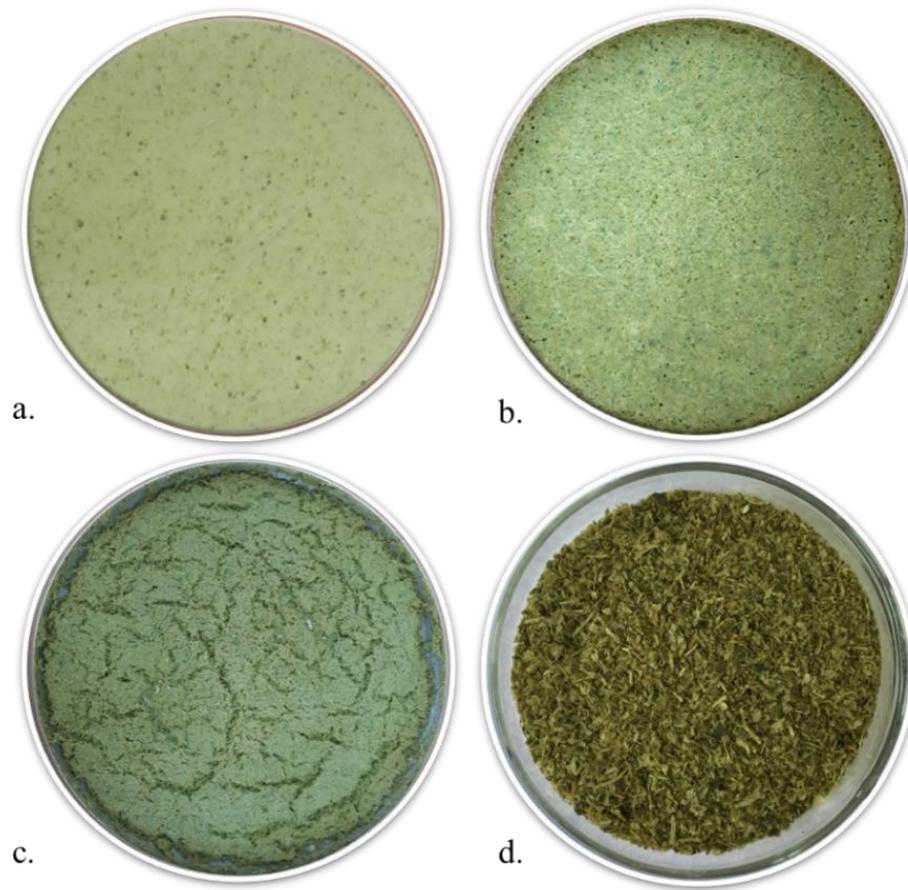


Fonte: Do autor (2021).

### 3.4. Ensaios de secagem

Imediatamente após a incorporação de ar, as espumas foram dispostas em bandejas de alumínio de 20 cm de diâmetro e diferentes espessuras ( $e = 0,5, 1,0$  e  $1,5$  cm) sendo, em seguida, secas em estufa de convecção forçada de ar sob temperatura controlada ( $T = 50, 70$  e  $90^{\circ}\text{C}$ ). A perda de umidade foi determinada pela pesagem das amostras em balança eletrônica em intervalos de 20 minutos, até que massas iguais fossem obtidas em três pesagens consecutivas. O conteúdo de umidade final, obtido após a estabilização da massa das amostras, foi considerado como o conteúdo de umidade de equilíbrio. Com o auxílio de uma espátula de metal, o material obtido foi raspado das bandejas e naturalmente se desfez, apresentando-se como um pó. A Figura 6 apresenta fotografias da bandeja metálica com espuma ao longo do processo e o produto seco.

Figura 6 – Bandeja com espuma antes (a), durante (b) e ao fim o processo de secagem (c) e o produto seco (d).



Fonte: Do autor (2021).

A taxa de secagem (DR) foi calculada através da Equação 11, que leva em consideração a diferença do conteúdo de umidade (M) em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ).

$$DR = -\frac{dM}{dt} = -\frac{M_{t+1} - M_t}{\Delta t} \quad (11)$$

O adimensional de umidade (MR) foi obtido através da Equação 12, utilizando-se os valores medidos de umidade inicial ( $M_0$ ), umidade de equilíbrio ( $M_e$ ) e umidade no instante de tempo das pesagens (M).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (12)$$

Aos resultados experimentais foram ajustados os modelos matemáticos de Lewis, Page, Henderson e Pabis e Midilli (apresentados na Tabela 1) através de uma regressão não linear

usando o *software* Excel (Microsoft). A adequação dos modelos foi avaliada pelo valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da soma do quadrado dos resíduos (SQR), calculado de acordo com a Equação 13, em que  $MR_{exp}$  é o valor observado para o adimensional de umidade e  $MR_{pred}$  é o valor predito pelo modelo.

$$SQR = \sum(MR_{exp} - MR_{pred})^2 \quad (13)$$

### 3.5. Caracterização do produto seco

#### 3.5.1. Umidade final

A umidade de equilíbrio é a menor umidade que um material pode alcançar sob determinadas condições de temperatura e pressão do processo de secagem (ALBINI; FREIRE; FREIRE, 2019). É uma característica determinante para a estabilidade de um alimento, uma vez que a água em excesso permite o crescimento de microrganismos e participa de reações químicas e/ou enzimáticas que deterioram o material.

A umidade final em base seca ( $M_s$ ) dos pós obtidos nos diferentes ensaios foi determinada pelo método gravimétrico a  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$  por 24h (AOAC, 1990), aplicando os valores de massa inicial ( $m_i$ ) e final ( $m_f$ ) na Equação 14.

$$M_s = \frac{m_i - m_f}{m_f} * 100 \quad (14)$$

#### 3.5.2. Diferença total de cor

A diferença total de cor ( $\Delta E$ ) indica a variação conjunta das coordenadas de luminosidade e as transições entre verde e vermelho e entre amarelo e azul, e é utilizada para descrever variações na cor de uma amostra quando comparada à um controle. Assim, maiores valores de  $\Delta E$  indicam maiores mudanças na cor da amostra em relação à referência (SARICOBAN; YILMAZ, 2010).

Parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) foram determinados para os materiais desidratados de forma similar à descrita para a polpa e a espuma (Figura 7.a). Estes parâmetros foram utilizados para o cálculo de  $\Delta E$  (definido pela equação 9) relacionado às mudanças de cor provocadas pelo processo de secagem em camada de espuma (entre a espuma e os pós).

#### 3.5.3. Densidade da partícula, propriedades *bulk* e escoabilidade

A densidade da partícula, ou densidade absoluta, é a densidade do material sem considerar o espaço vazio presente entre as partículas que o compõem. Seu conhecimento é de grande importância para etapas de processamento, estocagem e transporte de materiais

(FERRARI et al., 2012). É uma propriedade que também está relacionada à outras, como porosidade e escoabilidade do pó.

Através da picnometria líquida com álcool isopropílico ( $\rho=0,78$  g/mL), a densidade das partículas foi determinada. Em um picnômetro de 10 mL adicionou-se, aproximadamente, 0,3 g de pó e com isopropanol completou-se o volume total dessa vidraria (Figura 7.b). O conjunto foi pesado em uma balança analítica *Shimadzu* modelo *AUY220*, e, sabendo-se a massa de pó adicionado ao picnômetro e o volume ocupado pelo mesmo, a densidade do material foi calculada através da Equação 1.

Para caracterizar um material particulado, é necessário conhecer as propriedades da partícula isolada e do conjunto de partículas (propriedades *bulk*) (SOUSA, 2014). A densidade *bulk* relaciona a massa de um pó com o volume ocupado pelo mesmo, considerando, além do volume das próprias partículas, o espaço entre elas. Existem duas maneiras de estimar a densidade *bulk* de um pó; a primeira é determinada ao permitir que as partículas se depositem em um recipiente sob a ação da gravidade – densidade *bulk* aerada – e a segunda é obtida ao submeter o recipiente com a amostra à movimentações mecânicas que causam a sua compactação – densidade *bulk* compactada (ABDULLAH; GELDART, 1999). Essas propriedades dependem de fatores como o tamanho e a forma das partículas, a distribuição de tamanhos, a composição química do material, textura superficial e aglomeração, a condição utilizada no empacotamento, dentre outros e são utilizadas para determinar suas características e comportamento durante o processamento, manuseio, transporte e armazenamento (GERMAN, 1989; SEERANGURAYAR et al., 2017; SOUSA, 2014).

Para a determinação das densidades *bulk* aerada e compactada, uma amostra de pó de massa conhecida ( $m \approx 8$  g) foi inicialmente ‘solta’ sob ação da gravidade na extremidade superior de uma proveta de 100 mL (Figura 7.c). Conhecendo-se o volume ocupado pela amostra ( $V$ ), calculou-se a densidade *bulk* aerada através da Equação 15.

$$\rho_{lb} = \frac{m}{V} \quad (15)$$

Em seguida, a amostra foi compactada levantando a proveta a uma altura de aproximadamente 13 cm e soltando-a. Esse movimento foi realizado utilizando o dispositivo mostrado na Figura 7a, até que não se observasse variação no volume ocupado pelo material compactado. É importante ressaltar que o dispositivo em questão foi confeccionado a fim de manter uma altura de queda padrão, uma vez que esta altura interfere na compactação e,

consequentemente, no volume ocupado pela amostra. O volume do material compactado foi utilizado na Equação 16 para se obter a densidade *bulk* compactada.

$$\rho_{tb} = \frac{m}{V} \quad (16)$$

A porosidade *bulk* ( $\varepsilon$ ) representa a porcentagem do volume do material ocupada pelo ar, por isso, está interligada à densidade *bulk*. Um elevado valor de porosidade significa que há um maior espaço ocupado pelo ar e, consequentemente, maior quantidade de oxigênio disponível para reações de degradação do produto (FERRARI et al., 2012). Conhecendo-se o valor de densidade da partícula e *bulk* compactada, a porosidade *bulk* foi calculada conforme a Equação 17.

$$\varepsilon (\%) = \frac{\rho_p - \rho_{tb}}{\rho_{tb}} * 100 \quad (17)$$

Quando submetido à ação de uma força, o conjunto de partículas sofre um rearranjo de sua estrutura organizacional em relação à vizinhança e a facilidade com que o conjunto de partículas se rearranja pode ser entendida como a escoabilidade (SOUSA; FERREIRA, 2019a). A eficiência de operações como alimentação, compactação, estocagem e transporte de pós está intimamente relacionada com a sua escoabilidade, a qual é influenciada por fatores como o tamanho das partículas e sua distribuição, formato, composição química, entre outros (SOUSA; FERREIRA, 2019b).

A razão de Hausner (HR) e o índice de Carr (CI) são indicadores da escoabilidade de pós e são calculados a partir da densidade *bulk* aerada e compactada. A Tabela 2 apresenta a classificação da escoabilidade de pós, de acordo com os valores de HR e índice de Carr.

Tabela 2 – Classificação da escoabilidade de um pó de acordo com a razão de Hausner e o índice de Carr.

Escoabilidade	Razão de Hausner (-)	Índice de Carr (%)
Excelente	1,00-1,11	0-10
Boa	1,12-1,18	11-15
Razoável	1,19-1,25	16-20
Aceitável	1,26-1,34	21-25
Ruim	1,35-1,45	26-31
Muito ruim	1,46-1,59	32-37
Péssima	>1,60	>38

Fonte: Adaptado de Dehghannya et al. (2018a).

A partir dos valores das densidades *bulk* aerada e compactada, foi possível determinar a razão de Hausner (HR) e o índice de Carr (CI) a partir das Equações 18 e 19, respectivamente, e classificá-los quanto à escoabilidade de acordo com a Tabela 2.

$$HR = \frac{\rho_{tb}}{\rho_{lb}} \quad (18)$$

$$CI = \frac{\rho_{tb} - \rho_{lb}}{\rho_{lb}} \quad (19)$$

#### 3.5.4. Razão de reidratação

A reidratação consiste, simultaneamente, na embebição do produto desidratado, no inchaço dos componentes hidrofílicos e na lixiviação de sólidos solúveis, no qual o material seco deve absorver, de maneira rápida, o maior volume possível de água, tendo em vista o aumento do rendimento do produto (SOUZA et al., 2011). A razão de reidratação representa a quantidade de material reidratado em relação ao material seco, portanto, é interessante que o produto apresente elevada razão de reidratação para que possa ser incorporado em preparações.

A razão de reidratação foi determinada de acordo com a técnica descrita por (NG; SULAIMAN, 2018) com adaptações. Em um béquer foi adicionado aproximadamente 1 g de pó e 11 g de água que foram misturados com movimentos circulares até a homogeneização. Após 10 minutos, a mistura foi filtrada em um filtro de papel e depois de 1 minuto – tempo esperado para que o excesso de água deixasse o filtro – o conjunto foi pesado (Figura 7.d). Os valores de massa de amostra reidratada ( $m_{reidratada}$ ) e seca ( $m_{desidratada}$ ) foram aplicados à Equação 20.

$$Razão\ de\ reidratação = \frac{m_{reidratada}}{m_{desidratada}} \quad (20)$$

A Figura 7 apresenta os testes realizados para a caracterização dos pós.

Figura 7 – Determinação da cor (a), densidade da partícula (b), densidade *bulk* (c) e razão de reidratação (d).



Fonte: Do autor (2021).

### 3.5.5. Análise estatística

A fim de estudar a interferência da temperatura do ar e espessura da camada de espuma nas propriedades dos pós de couve e encontrar os parâmetros operacionais ótimos, foi desenvolvido um planejamento fatorial do tipo  $3^2$  com réplicas em todos os pontos.

A análise foi realizada através do *software* Statistica versão 7.0, com intervalo de confiança de 95%. Foi avaliada a influência da variação dos parâmetros na umidade final, densidade da partícula, diferença total de cor e razão de reidratação dos produtos obtidos. As condições operacionais ideais foram determinadas de acordo com a desejabilidade em relação às propriedades analisadas, isto é, mínima umidade final, densidade da partícula e variação global de cor e máxima razão de reidratação.

A Tabela 3 apresenta o planejamento fatorial realizado, com as diferentes combinações das variáveis analisadas, sendo que a variável “X” corresponde à temperatura do ar de secagem e a “Y”, à espessura da camada fina. Os valores da variável na escala real ( $\xi_i$ ), média ( $\bar{\xi}_i$ ) e diferença ( $d_i$ ) entre os níveis altos e baixos na escala real foram substituídos na Equação 21 para a obter o valor da variável codificada.

$$X_i = 2 * \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{d_i} \quad (21)$$

Tabela 3 – Valores das variáveis codificadas e reais do planejamento experimental

Ensaio	Variável codificada		Variável real	
	X	Y	Temperatura (°C)	Espessura da camada fina (cm)
1	-1	-1	50	0,5
2	-1	0	50	1
3	-1	1	50	1,5
4	0	-1	70	0,5
5	0	0	70	1
6	0	1	70	1,5
7	1	-1	90	0,5
8	1	0	90	1
9	1	1	90	1,5

Vale ressaltar que, a fim de evitar a interferência de condições externas ao experimento e a geração de erros sistemáticos, os experimentos foram realizados em sequência randômica.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Polpa e espuma

As densidades da polpa (primeira linha) e das espumas obtidas pelo uso dos diferentes agentes emulsificantes estão apresentadas na Tabela 4, onde foram incluídos os valores de expansão calculados pelo uso da Eq. (8).

Tabela 4 – Densidade da polpa e espumas e expansão.

Agente espumante	Concentração mássica (%)	$\rho$ (g/mL)	Expansão (%)
-	-	$1,01 \pm 0,01$	-
Emustab <sup>®</sup>	2,5	$0,145 \pm 0,012$	$595,8 \pm 55,0$
Emustab <sup>®</sup>	5	$0,181 \pm 0,001$	$455,6 \pm 3,2$
Emustab <sup>®</sup>	10	$0,202 \pm 0,004$	$398,9 \pm 9,4$
Albumina em pó	10	$0,786 \pm 0,026$	$28,2 \pm 4,2$

De acordo com Van Arsdel e Copley (1964), para a secagem em camada de espuma, a densidade das espumas deve estar na faixa de 0,1 a 0,6 g/mL. Ainda, segundo Bates (1964), espumas com densidades inferiores a 0,5 g/mL podem ser consideradas mecânica e termicamente estáveis, não se observando, assim, o colapso da estrutura e nem a drenagem. Nesse sentido, a espuma a base de albumina em pó apresentou densidade fora do intervalo adequado e baixa expansão (28,2%), além de apresentar um grande volume coalescido, como mostrado na Fig. (4f). Sabe-se que, em alguns casos, a estabilidade de espumas produzidas com albumina não é suficiente e faz-se necessária a utilização de agentes estabilizantes (DEHGHANNYA et al., 2018a). No entanto, isso tornaria o processo mais oneroso e aumentaria a quantidade de aditivo incorporado ao alimento, o que não é desejável considerando eventual comercialização do produto.

O uso de Emustab<sup>®</sup> produziu espumas com densidades adequadas para a secagem ( $\rho \leq 0,202$  g/mL) e foi possível observar menores valores de  $\rho$ , e conseqüentemente, maiores valores de expansão, com a diminuição da concentração de aditivo incorporada. Uma provável explicação para este comportamento está relacionada à viscosidade da mistura entre polpa e agente espumante: Bikerman (1973) relacionou a diminuição da capacidade de um líquido de aprisionar ar durante o batimento ou mistura mecânica com o aumento de sua viscosidade. O Emustab<sup>®</sup> é uma substância evidentemente viscosa, portanto, sua alta concentração pode ter elevado consideravelmente a viscosidade da mistura e prejudicado a incorporação do ar. O mesmo comportamento foi relatado por Fernandes (2010) ao analisar a viscosidade da espuma

de cajá sob diferentes concentrações do mesmo agente espumante. Independente do teor de Emustab<sup>®</sup> utilizado, os resultados encontrados mostram ainda que a expansão das espumas é muito superior a 100%, valor considerado ideal para o processo de secagem (DANTAS, 2010).

A retenção de ar durante a agitação – caracterizada pela diminuição da densidade e pela expansão da espuma – é responsável pelo aumento da interface gás-líquido, o que eleva a taxa de transferência de massa durante o processo de secagem da espuma. Assim, a formulação com concentração de 2,5% (m/m) de Emustab<sup>®</sup> foi selecionada para uso nos experimentos de secagem e caracterizações posteriores. Ademais, devido à menor quantidade de emulsificante adicionada à polpa, o processo é mais econômico e o produto mais natural.

A Tabela 5 mostra os valores de estabilidade da espuma contendo 2,5% (m/m) de Emustab<sup>®</sup> nas temperaturas de 50, 70 e 90°C. Na secagem em camada de espuma, a estabilidade da espuma é um fator crítico, pois a espuma deve reter sua estrutura ao longo da secagem, mantendo a área superficial e o efeito capilar elevados (HART et al., 1963). Se o colapso ocorre, há efeitos negativos sobre a qualidade do produto (ABD KARIM; WAI, 1999). Os pequenos valores de volume coalescido (inferiores a 4 mL após 2 h) refletem a elevada estabilidade da espuma. De acordo com Bag, Srivastav e Mishra (2011), espumas que não colapsam em pelo menos 1 hora são consideradas estáveis mecânicas termicamente durante todo o processo. Portanto, os resultados observados demonstram que, além da significativa expansão, o Emustab<sup>®</sup> garante à espuma a estabilidade necessária para a secagem em camada fina.

Tabela 5 – Estabilidade da espuma com 2,5% (m/m) de Emustab<sup>®</sup> em diferentes temperaturas

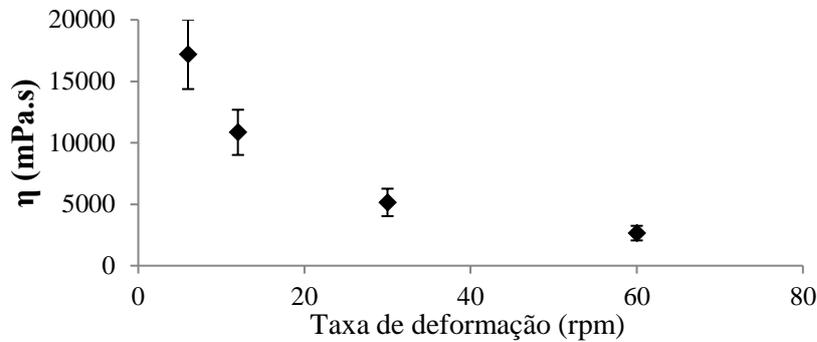
Temperatura (°C)	Estabilidade (%)
50	97,96 ± 0,00
70	97,53 ± 0,21
90	94,33 ± 0,21

O pH tem grande influência na limitação dos tipos de microrganismos que irão se desenvolver no alimento, uma vez que a maioria se desenvolve em faixas de pH próxima à neutralidade, entre 6,6 a 7,5 (GAVA; DA SILVA; FRIAS, 2009). A formação da espuma não alterou consideravelmente o pH levemente ácido da polpa, que passou de (5,58±0,01) para (5,57±0,1), o que demonstra que a incorporação do aditivo não interfere na acidez do alimento, mantendo valor abaixo da faixa propícia para o desenvolvimento de microrganismos.

Os valores de viscosidade ( $\eta$ ) para as diferentes velocidades de rotação do spindle foram plotados em um gráfico, como ilustra a Figura 8, no qual é possível observar o comportamento

apresentado pela espuma ao ser submetida às diferentes taxas de deformação (a barra indica o desvio padrão do valor médio).

Figura 8 – Viscosidade da espuma para diferentes taxas de deformação.

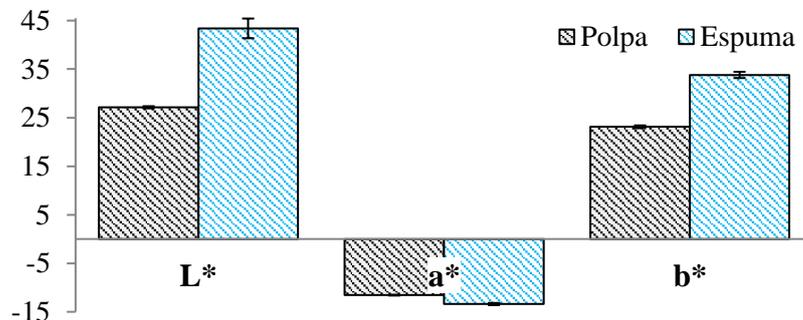


Fonte: Do autor (2021).

Observa-se que a viscosidade da espuma decresce de maneira não linear com o aumento da taxa de deformação, apresentando, portanto, o comportamento de um fluido não-newtoniano pseudoplástico. Fernandes (2010) reportou o mesmo comportamento para espumas de cajá obtidas com a adição de Emustab®.

A Figura 9 apresenta os valores das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  obtidas para a polpa e espuma. O aumento do valor da coordenada  $L^*$  indica o clareamento da espuma em relação à polpa. A coordenada  $a^*$  tornou-se mais negativa, enquanto a coordenada  $b^*$  aumentou seu valor, demonstrando que a produção da espuma aumentou a tendência às cores verde e amarelo.

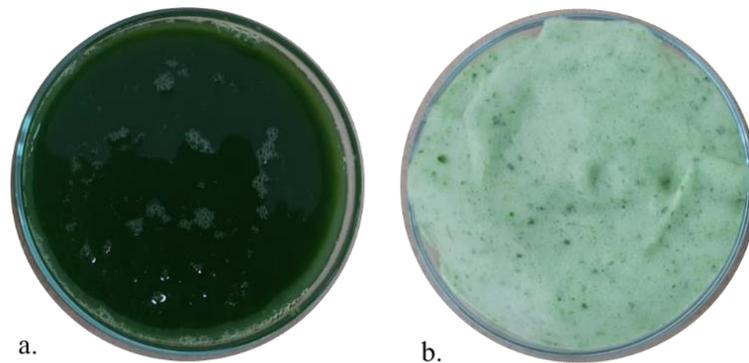
Figura 9 – Valores das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  para a polpa e espuma.



Fonte: Do autor (2021).

Uma análise da Figura 10, que mostra fotografias da polpa e espuma, atesta os resultados obtidos por colorimetria.

Figura 10 – Polpa (a) e espuma (b) de talos e folhas de couve.



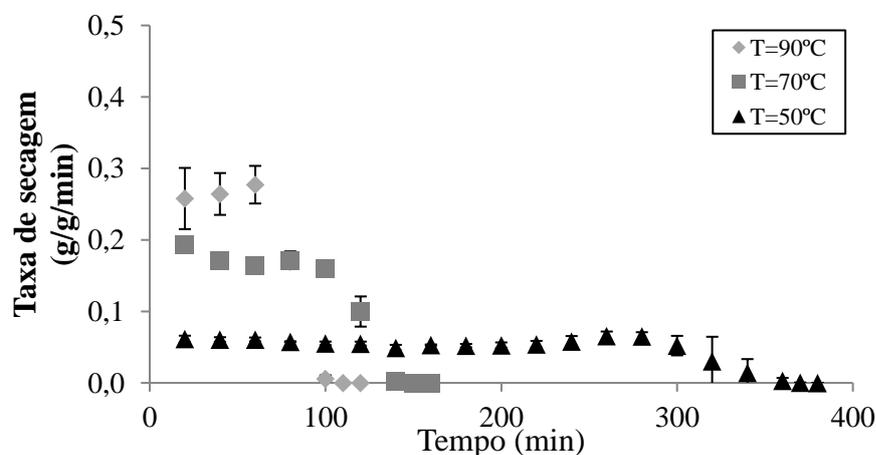
Fonte: Do autor (2021).

Como exposto anteriormente, maiores valores de  $\Delta E$  indicam maiores mudanças na cor da amostra em relação à referência, o que não é desejável, uma vez que o produto perde a característica do alimento em seu estado natural. O valor de  $\Delta E$  obtido para a espuma utilizando a polpa como controle foi igual a  $15,30 \pm 1,78$ , comprovando que há variação de cor no processo inicial de formação da espuma e corroborando a observação visual das amostras (Figura 10).

#### 4.2. Secagem

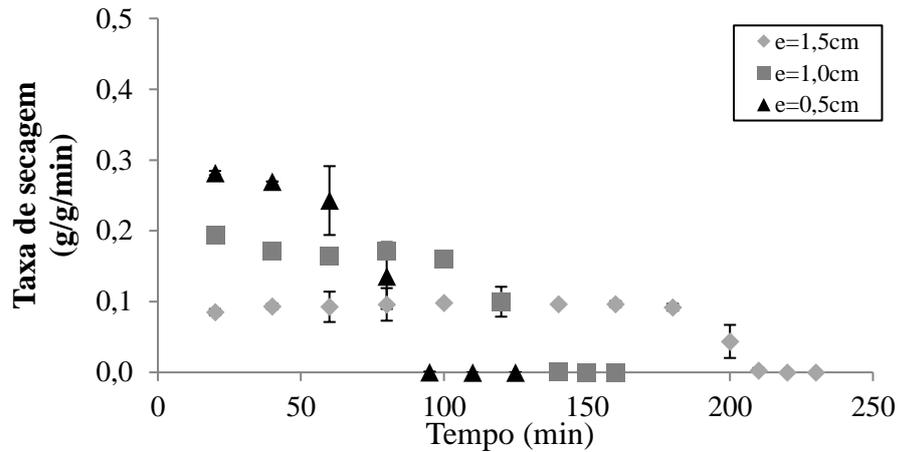
As Figuras 11 e 12 mostram as curvas de taxa de secagem em função do tempo parametrizadas, respectivamente, na temperatura (com 'e' constante e igual a 1,0 cm) e na espessura de camada fina (com  $T=70^{\circ}\text{C}$ ). As curvas obtidas para as demais condições de 'e' e 'T', não reportadas por motivos de concisão, foram qualitativamente semelhantes às apresentadas nas referidas figuras.

Figura 11 – Taxa de secagem em relação ao tempo parametrizado em 'T' com  $e=1,0$  cm.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 12 – Taxa de secagem em relação ao tempo parametrizado em ‘e’ com  $T=70^{\circ}\text{C}$ .



Fonte: Do autor (2021).

Os gráficos das Figuras 11 e 12 indicam que o período de taxa constante prevalece durante o processo nas condições avaliadas, sugerindo que o mecanismo convectivo controla a secagem. Isso significa que a água no interior da espuma se move em direção à superfície do material a uma velocidade suficiente para repor a umidade perdida na evaporação superficial. A interferência da temperatura do ar no valor da taxa de secagem é claramente evidenciada ao analisar a Figura 11: para uma espessura de camada fina igual a 1,0 cm, a velocidade de secagem para  $T=90^{\circ}\text{C}$  é superior a três vezes a taxa obtida com o uso de  $T=50^{\circ}\text{C}$ . Isso acontece porque uma maior diferença de temperatura entre o ar de secagem e a espuma implica em uma maior força motriz para o processo de transferência de calor e, conseqüentemente, para a secagem.

Já em relação à espessura da camada de espuma, a diminuição no valor de ‘e’ causa um aumento na taxa de secagem, como mostram os gráficos da Figura 12. Isso pode ser explicado pelo fato de que a transferência de calor é mais eficiente em camadas mais finas, além do fato de que a umidade percorre um menor caminho do interior até a superfície do material.

Não é comum a existência do período de taxa constante na secagem de produtos agrícolas e alimentícios, de forma que quase sempre o período de taxa decrescente é o único observado (PARK et al., 2014). Isso pode ser explicado pela natureza da umidade no material, uma vez que esta se encontra na forma de suspensão ou solução (de açúcares ou outras moléculas). Por conseqüência, a pressão de vapor da umidade livre superficial se torna menor que a da água pura, o que diminuiu a força motriz para o processo de secagem (FRANCO et al., 2016, 2017). Uma hipótese para explicar o comportamento observado é a elevada quantidade de água adicionada para a obtenção da polpa, que pode ter originado uma solução

diluída e, portanto, sem considerável redução de sua pressão de vapor. Nota-se ainda, a partir das Figuras 11 e 12, uma redução nas taxas de secagem ao final do processo de secagem da couve em camada de espuma. Este período de taxa decrescente é caracterizado por um aumento na resistência interna e no qual a velocidade da secagem depende majoritariamente da difusão da água através do material até a superfície.

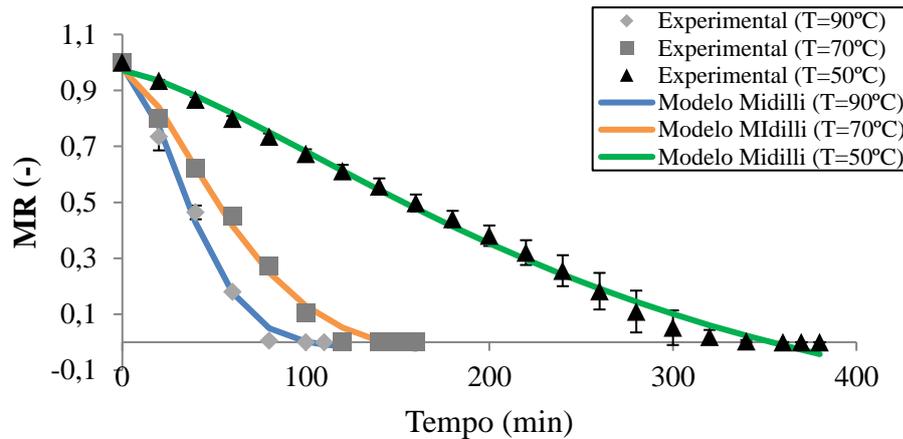
Ao analisar os gráficos do adimensional de umidade em função do tempo (Figuras 13 e 14), é possível observar uma boa reprodutibilidade dos resultados, com desvios inferiores a 0,078. Para as nove condições estudadas, o modelo matemático de Midilli foi o que melhor descreveu os resultados observados na secagem, com coeficiente de determinação ( $R^2 \geq 0,994$ ) e soma do quadrado dos resíduos ( $SQR \leq 0,013$ ).

A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros do modelo de Midilli, calculados a partir dos valores médios das réplicas, bem como os valores de  $R^2$  e SQR. Os valores dos parâmetros obtidos para os demais modelos bem como para o coeficiente de determinação e soma do quadrado dos resíduos estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo de Midilli das condições avaliadas.

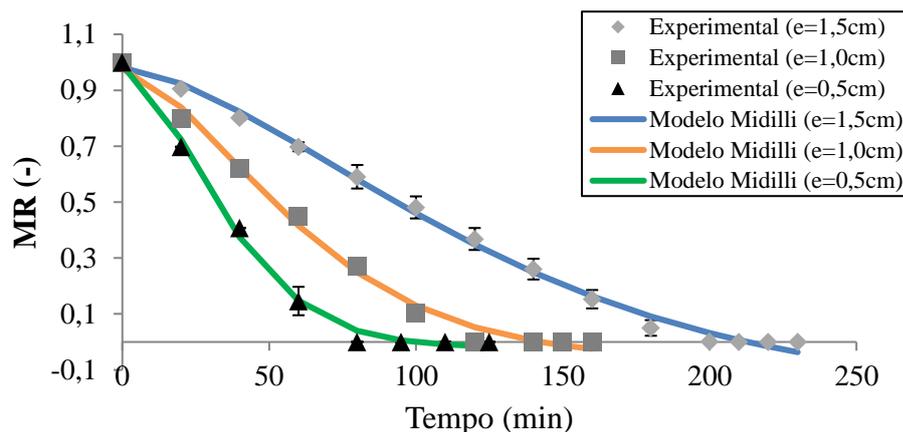
Ensaio	Parâmetro				$R^2$	SQR
	a	b	K	n		
1	0,982	-2,42E-04	0,003	1,402	0,995	0,006
2	0,972	-4,48E-04	0,0004	1,427	0,994	0,013
3	0,981	-5,01E-04	0,0004	1,366	0,997	0,012
4	0,991	-1,46E-04	0,002	1,625	0,996	0,004
5	0,977	-2,89E-04	0,001	1,571	0,994	0,008
6	0,981	-5,22E-04	0,0004	1,599	0,996	0,007
7	0,996	-1,81E-04	0,009	1,635	0,998	0,002
8	0,987	-1,55E-04	0,001	1,747	0,995	0,005
9	0,975	-2,09E-04	0,001	1,775	0,995	0,006

Figura 13 – Adimensional de umidade experimental e predito em relação ao tempo parametrizado na temperatura com  $e=1,0\text{cm}$ .



Fonte: Do autor (2021).

Figura 14 – Adimensional de umidade experimental e predito em relação ao tempo parametrizado na espessura com  $T=70^{\circ}\text{C}$  (b).



Fonte: Do autor (2021).

Em concordância com o exposto para a taxa de secagem, os gráficos do adimensional de umidade em relação ao tempo evidenciam a influência da espessura da camada de espuma e da temperatura do ar no tempo de secagem do material: conforme esperado, a secagem mais rápida – 60 min – se deu para a condição de maior temperatura e menor espessura, enquanto a condição oposta apresentou a secagem mais longa – 470 min.

### 4.3. Propriedades do produto seco

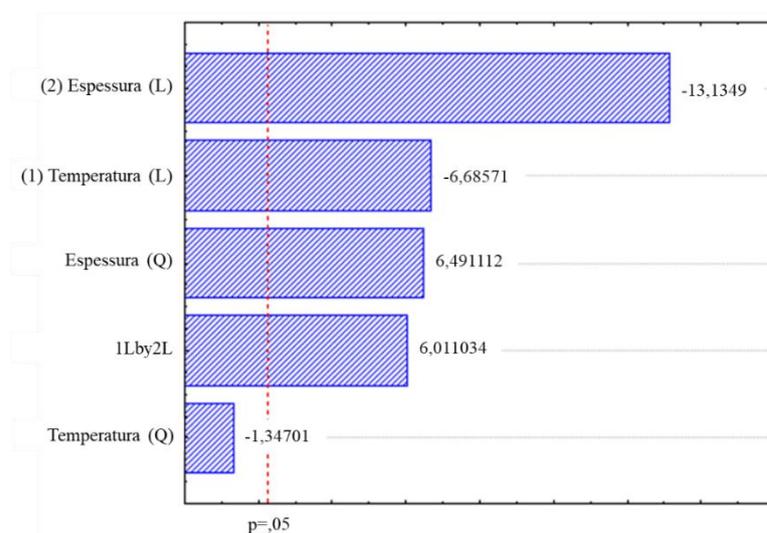
#### 4.3.1. Umidade final

Os pós de couve apresentaram umidade final entre 4,77 e 18,89% (b.s.). O baixo conteúdo de umidade observado atesta a eficácia da técnica empregada para a secagem dos talos e folhas de couve. No Brasil, a RDC nº 272 de 25 de setembro de 2005 determina como limite

máximo para produtos vegetais secos ou desidratados o valor de umidade de 12% (b.s.), isto é, a cada 100 g de material, é permitido um conteúdo máximo de 12 g de água. Ao considerar a legislação vigente para produtos vegetais secos, a maioria das condições experimentais atendem ao limite máximo. Isso significa que o processo de secagem foi capaz de reduzir o conteúdo de umidade do material a um ponto em que este se torna consideravelmente mais estável e, por consequência, o alimento pode ser comercializado.

Com relação a influência das condições experimentais, a Figura 15 apresenta o diagrama de Pareto obtido para a umidade final. Observa-se que tanto a espessura quanto a temperatura linear “(L)” apresentaram influência negativa na umidade final, sendo a espessura linear o efeito mais significativo na resposta. Isso significa que o aumento desses parâmetros causa diminuição do valor da variável resposta.

Figura 15 – Diagrama de Pareto para a umidade final dos pós.



Fonte: Do autor (2021).

A observação da diminuição da umidade final com o aumento da temperatura era o comportamento esperado e está coerente com o reportado por outros autores, como Hamzeh et al. (2019). Uma maior temperatura do ar de secagem gera um maior gradiente de temperatura entre o ar e a espuma; isto significa que a força motriz para o processo de vaporização da água se torna maior.

Por outro lado, o comportamento observado com relação à espessura difere-se do esperado. A formação de uma crosta na superfície superior das espumas foi notada durante o processo de secagem, como mostra a fotografia da Figura 16 – o que pode ter interferido na

redução da umidade. Hipoteticamente, a crosta pode ter influenciado com maior intensidade as espumas de menor espessura, uma vez que a velocidade de secagem nessa condição é consideravelmente maior e, por consequência, a crosta pode ter sido formada mais rapidamente sob a bandeja.

Figura 16 – Bandeja com material seco ao fim do processo de secagem.

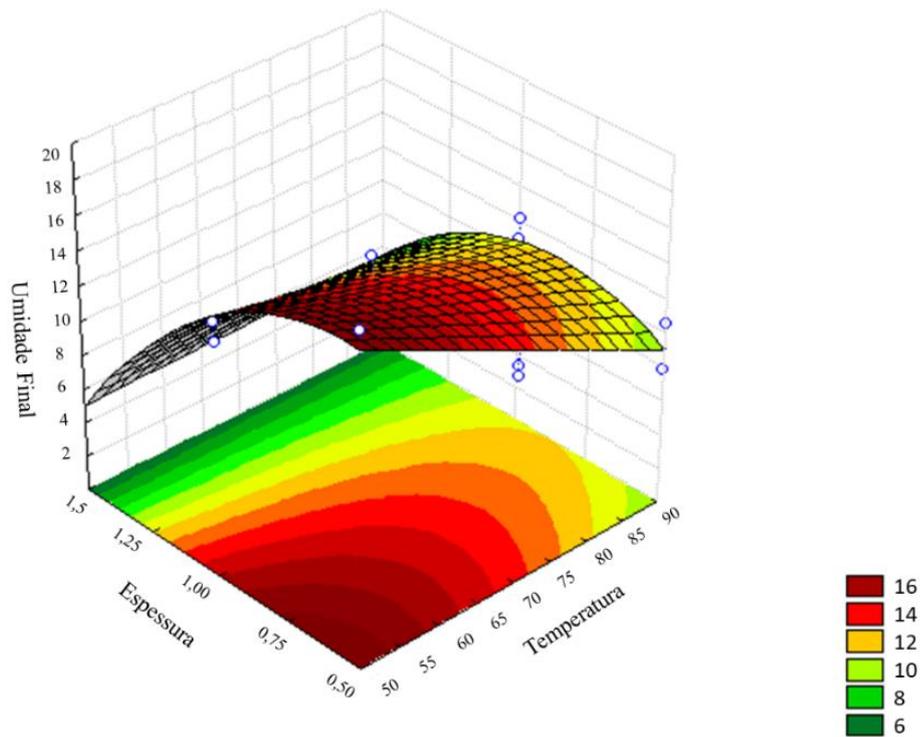


Fonte: Do autor (2021).

No entanto, o efeito quadrático “(Q)” da espessura seguiu o comportamento esperado – a umidade final aumenta com a espessura. Isso pode ser explicado devido ao maior caminho que a umidade deve percorrer do interior até a superfície do material quando a camada de espuma é mais espessa, além do fato de que a transferência de calor é mais lenta em camadas maiores. O efeito quadrático da temperatura não exerceu influência significativa na umidade final ( $p < 0,05$ ).

A superfície de resposta apresentada na Figura 17 permite observar o comportamento explicitado pelo diagrama de Pareto. É possível observar que o aumento da temperatura do ar e da espessura de camada fina promovem a diminuição da umidade final dos pós. Observa-se que para temperaturas do ar de secagem abaixo de 80°C, o conteúdo de umidade das amostras foi alto para espessuras de até cerca de 1,25 cm, levando em consideração o limite de 12%. Por outro lado, temperaturas acima de 80°C atendem o limite estabelecido, independente da espessura da camada fina. Da mesma forma, para espessuras entre 1,25 e 1,5 cm, o limite estabelecido em lei é atendido, independente da temperatura do ar de secagem utilizada.

Figura 17 – Superfície de resposta para a umidade final dos pós.



Fonte: Do autor (2021).

Sabe-se que a secagem em temperaturas altas pode causar a perda de compostos voláteis presentes nos alimentos, a degradação de componentes nutracêuticos, o escurecimento do produto, além da maior demanda energética requerida pelo processo. Portanto, neste caso, o interessante é optar por temperaturas mais brandas e maiores espessuras de camada de espuma.

A Equação 22 apresenta o modelo gerado ( $R^2=0,946$ ) para a umidade final dos pós de couve, em que é possível notar que a interação entre os fatores ( $X*Y$ ) também leva à um aumento da umidade final:

$$M_s = 12,863 - 2,0967 * T - 4,1192 * e + 2,30875 * T * e - 3,5258 * e^2 + 0 \quad (22)$$

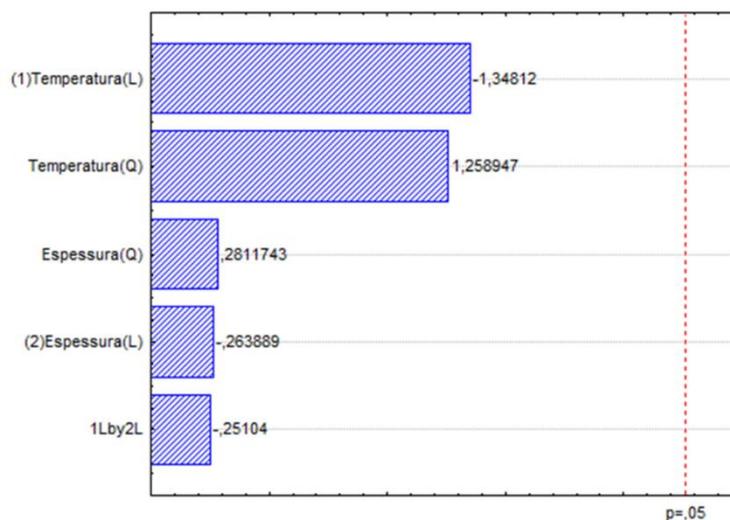
#### 4.3.2. Densidade da partícula

A densidade dos pós obtidos nas diferentes condições de secagem variou entre 0,902 e 1,17 g/cm<sup>3</sup>. Os valores estiveram abaixo do reportado por outros autores como Franco et al. (2016) para yacon – 1,18 a 1,21 g/cm<sup>3</sup>; Jakubczyka, Gondeka e Tamborb (2011) para suco de maçã – 1,39 a 1,54 g/cm<sup>3</sup>, e Seerangurayar et al. (2017) para tâmara – 1,45 a 2,01 g/cm<sup>3</sup>.

A Figura 18 mostra o diagrama de Pareto obtido para a densidade das partículas, em que é possível observar que a variação da temperatura e espessura de camada de espuma não

influenciaram significativamente os valores de densidade das partículas dos pós ( $p < 0,05$ ). O mesmo resultado foi reportado por Franco et al. (2016) para pós de yacon obtidos por secagem *foam mat* sob diferentes condições de temperatura e espessura de camada fina.

Figura 18. Diagrama de Pareto para a densidade das partículas dos pós.



Fonte: Do autor (2021).

#### 4.3.3. Cor

A cor é uma característica muito importante de um alimento seco, pois está intimamente relacionada com a aceitação deste produto pelos seus consumidores. Logo, visando à comercialização do pó de couve, é importante que este apresente coloração mais próxima possível do produto *in natura*, em especial, quanto à sua tonalidade verde.

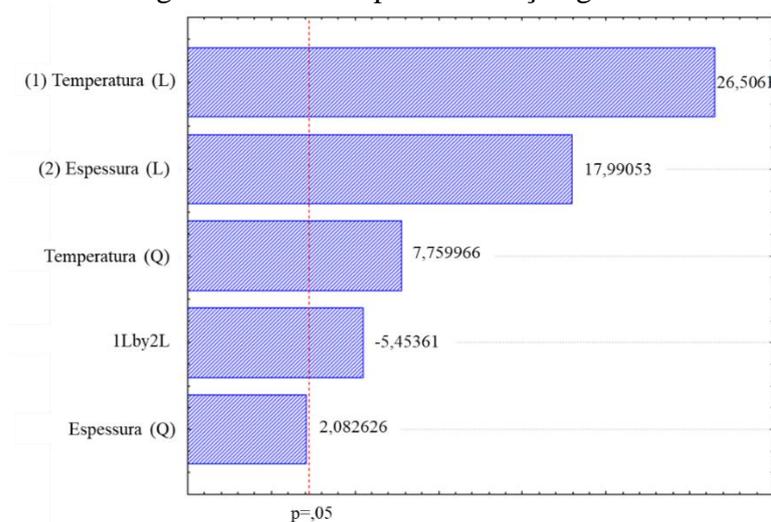
As análises de cor dos pós demonstraram que a luminosidade do produto se manteve próxima à da espuma ( $L^*=43,40$ ), com  $L^*$  variando entre 44,71 e 50,15. Os pós obtidos sob maiores temperaturas e espessura de camada fina apresentaram menor luminosidade, o que já era esperado pois o maior aquecimento gerado por essas condições leva a reações de escurecimento do material.

A coordenada  $a^*$  apresentou-se muito distante dos valores observados para a espuma ( $a^*=-13,40$ ) – entre -0,75 e 1,45 – indicando que a secagem ocasionou uma diminuição considerável da tendência ao verde, sendo que os materiais secos sob maiores temperaturas e espessuras apresentaram maiores valores de  $a^*$ . É possível que a clorofila – substância de coloração verde encontrada em organismos fotossintéticos – tenha se degradado sob condições de alto aquecimento. Oliveira et al. (2015) observaram maior redução do conteúdo de clorofila com o aumento da temperatura de secagem de couve galega.

Da mesma forma, pós obtidos nessas condições apresentaram menores valores de  $b^*$  e mesma hipótese se aplica à notável variação nos valores dessa coordenada. Os valores para coordenada  $b^*$  diminuíram em relação à espuma ( $b^*=33,80$ ) –  $b^*$  entre 20,45 e 26,24 – o que indica uma redução da tendência ao amarelo. Altas temperaturas podem ter levado à perda de compostos de cor amarelada presentes no alimento, como os carotenoides luteína e betacaroteno. Quek, Chok e Swedlund (2007), por exemplo, reportaram maiores perdas de betacaroteno para maiores temperaturas de secagem de melancia em spray dryer.

Os valores dos parâmetros acima discutidos foram usados para a determinação de  $\Delta E$  dos pós, calculados com o uso da Eq. (9). Os valores obtidos se mantiveram entre 16,22 e 19,76 para todas as condições avaliadas. Estes valores foram usados na análise estatística dos dados e serão discutidos a seguir. A Figura 19 apresenta o diagrama de Pareto para a variação global da cor dos pós obtidos em relação à espuma.

Figura 19 – Diagrama de Pareto para a variação global da cor dos pós.



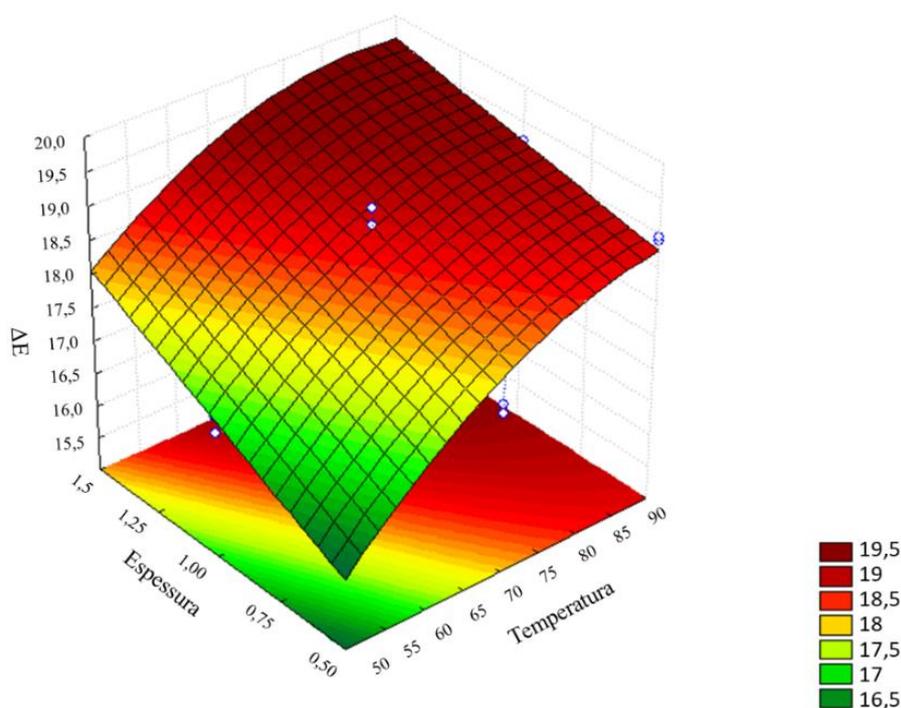
Fonte: Do autor (2021).

É possível concluir que tanto a temperatura (linear e quadrática) quanto a espessura linear influenciaram de maneira significativa a coloração dos produtos, sendo observado efeito positivo para as três variáveis. Isso que significa que a diferença total de cor aumenta com maiores valores de temperatura e espessura de camada fina, como esperado, uma vez que sob estas condições o material sofre maior aquecimento por estar submetido à maior temperatura de ar de secagem e por permanecer por maior período no interior da estufa.

A iteração entre temperatura e espessura apresentou menor influência sob a variável analisada, sendo observada uma relação inversamente proporcional. O efeito quadrático da espessura, por sua vez, não apresentou influência significativa no valor de  $\Delta E$  ( $p < 0,05$ ).

A Figura 20 apresenta a superfície de resposta para  $\Delta E$  em função da temperatura do ar e espessura de camada fina, e a Equação 23 apresenta o modelo obtido para a diferença total de cor ( $R^2=0,951$ ).

Figura 20 – Superfície de resposta para a diferença total de cor dos pós.



Fonte: Do autor (2021).

$$\Delta E = 18,68 + 1,0742 * T + 0,72910 * e - 0,27069 * T * e - 0,54470 * T^2 + 0 \quad (23)$$

Observa-se através da superfície de resposta que os valores de  $\Delta E$  apresentam maior variação com a temperatura que com a espessura, como apresentado pelo diagrama de Pareto. Além disso, a superfície de resposta evidencia o comportamento esperado: menores temperaturas de secagem e espessura de camada fina provocam menores alterações na coloração do material uma vez que o aquecimento mais brando evita um drástico escurecimento e degradação dos componentes naturais presentes nos alimentos. Sendo assim, é válido ressaltar, novamente, a preferência por temperaturas do ar de secagem mais baixas a fim de

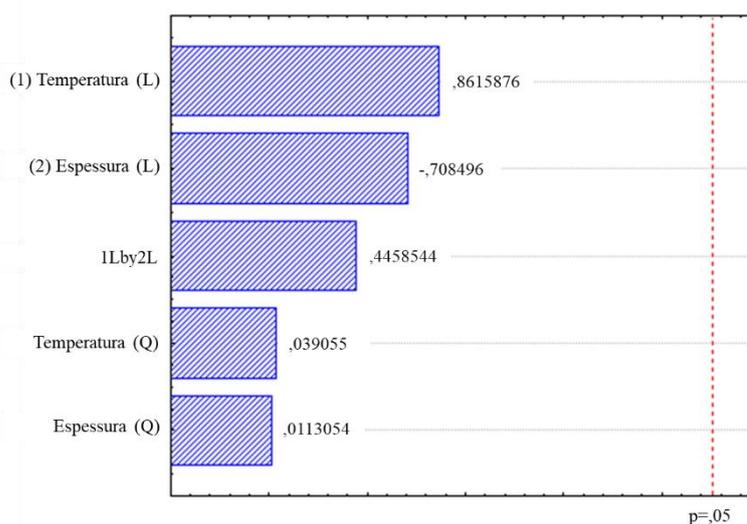
evitar que a cor do produto apresente grande variação em relação ao produto em seu estado natural e que o mesmo perca sua capacidade nutricional.

#### 4.3.4. Razão de reidratação

Os valores de razão de reidratação variaram entre 7,29 e 7,76. Isso mostra que os pós apresentam reidratação satisfatória, o que é bom quando se pensa na incorporação em preparações alimentícias. Ademais, os valores estão de acordo com os reportados por outros autores como Ng e Sulaiman (2018), que obtiveram resultados entre 5 e 8,15 para pós de beterraba secos em camada de espuma.

A Figura 21 apresenta o diagrama de Pareto para a razão de reidratação, onde é possível verificar que as diferentes condições de temperatura e espessura de camada fina não influenciaram significativamente a capacidade de reidratação dos pós de couve ( $p < 0,05$ ). De acordo com Ng e Sulaiman (2018), uma elevada razão de reidratação pode estar relacionada a uma baixa densidade *bulk*, além de outras características como porosidade e tamanho da partícula. Como será apresentado posteriormente, todas as condições geraram pós de baixa densidade *bulk* e alta porosidade e com baixa variação em seu valor, o que pode justificar a boa razão de reidratação dos pós independente da condição de secagem.

Figura 21 – Diagrama de Pareto para a razão de reidratação dos pós.



Fonte: Do autor (2021).

#### 4.3.5. Propriedades *bulk* e escoabilidade

A Tabela 7 apresenta os valores médios e desvios para as densidades *bulk* aerada e compactada e porosidade dos pós obtidos nas diferentes condições experimentais.

Tabela 7 – Densidade *bulk* aerada, compactada e porosidade dos pós

Ensaio	$\rho_{lb}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{tb}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\varepsilon$ (%)
1	0,0925 ± 0,0008	0,1290 ± 0,000	86,81 ± 1,07
2	0,1151 ± 0,0012	0,1667 ± 0,000	84,78 ± 0,07
3	0,1160 ± 0,0024	0,1571 ± 0,0087	84,79 ± 1,48
4	0,0947 ± 0,0008	0,1301 ± 0,0015	88,83 ± 1,16
5	0,1019 ± 0,0009	0,1356 ± 0,0033	86,10 ± 1,82
6	0,1159 ± 0,0000	0,1584 ± 0,0022	84,75 ± 2,16
7	0,1074 ± 0,0031	0,1416 ± 0,0018	84,01 ± 3,15
8	0,1119 ± 0,0033	0,1497 ± 0,0059	84,74 ± 3,17
9	0,1151 ± 0,0012	0,1482 ± 0,0039	83,45 ± 2,85

A densidade *bulk* aerada e compactada variou entre 0,0925 a 0,116 g/cm<sup>3</sup> e 0,129 a 0,167 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Naturalmente, a densidade *bulk* compactada é maior que a aerada, pois a compactação faz com que as partículas menores ocupem o espaço vazio entre as maiores, o que resulta em uma condição de empacotamento densa (MITRA et al., 2017).

Assim como para a densidade da partícula, tanto os valores de densidade *bulk* aerada quanto compactada estiveram abaixo do reportado na literatura. Dehghannya et al. (2018a) encontraram valores entre 0,336 e 0,4 g/cm<sup>3</sup> para  $\rho_{lb}$ , e de 0,511 a 0,598 g/cm<sup>3</sup> para  $\rho_{tb}$ , para o pó de suco de limão, enquanto Seerangurayar et al. (2017) reportaram valores entre 0,35 e 0,70 g/cm<sup>3</sup> (aerada) e 0,75 e 0,90 g/cm<sup>3</sup> (compactada) para pós de tâmara obtidos através da secagem em camada de espuma e sob diferentes condições de processo.

Os valores de porosidade *bulk* dos pós foram altos, entre 83,45 e 88,83%. De acordo com Franco et al. (2016), a incorporação de ar à polpa durante a preparação da espuma pode ser a responsável pelos elevados valores de porosidade, uma vez que o ar se acumula no interior das partículas, o que as tornam porosas e leves. Como exposto anteriormente, uma elevada porosidade significa que há um considerável número de espaço vazio entre as partículas ocupado por oxigênio, o qual pode participar de reações de degradação do material (FERRARI et al., 2012). Apesar disso, há alternativas que possibilitam uma eventual comercialização do produto. O processo de embalagem à vácuo, por exemplo, consiste em acondicionar o material em embalagens com barreira aos gases e minimiza não apenas a oxidação, mas também a o crescimento de microrganismos e a descoloração do produto (MANTILLA et al., 2010).

A respeito da escoabilidade, tanto a razão de Hausner quanto o índice de Carr, indicam que os pós apresentam escoabilidade ruim a aceitável, independente da condição de secagem, como é possível observar através da Tabela 8.

Tabela 8 – Razão de Hausner, índice de Carr e escoabilidade dos pós

Ensaio	HR (g/cm <sup>3</sup> )	Escoabilidade	CI (g/cm <sup>3</sup> )	Escoabilidade
1	1,395 ± 0,0114	Ruim	28,32 ± 0,59	Ruim
2	1,448 ± 0,0147	Ruim	30,93 ± 0,70	Ruim
3	1,354 ± 0,0474	Ruim	26,11 ± 2,58	Ruim
4	1,374 ± 0,0043	Ruim	27,22 ± 0,23	Ruim
5	1,331 ± 0,0439	Aceitável	24,83 ± 2,48	Aceitável
6	1,366 ± 0,0191	Ruim	26,81 ± 1,02	Ruim
7	1,318 ± 0,0210	Aceitável	24,14 ± 1,21	Aceitável
8	1,337 ± 0,0134	Aceitável	25,19 ± 0,75	Aceitável
9	1,288 ± 0,0468	Aceitável	22,29 ± 2,83	Aceitável

É esperado que os pós apresentem boa escoabilidade, tendo em vista o manuseio do produto durante as etapas de processamento, estocagem, transporte e embalagem do material. Neste caso, foram observados pós com escoabilidade ruim e aceitável e nenhuma das condições experimentais geraram pós com escoabilidade desejada. De qualquer forma, assim como para a porosidade, há estudos que visam desenvolver e avaliar alternativas que permitem operações com pós de difícil escoabilidade, como por exemplo, o alimentador não-mecânico tipo ‘válvula-L’, detalhado no estudo de Sousa e Ferreira (2019b).

#### 4.3.6. Desejabilidade e condições operacionais ótimas

As condições operacionais ótimas foram obtidas através do cálculo da desejabilidade, com base no resultado desejável para as variáveis analisadas no estudo estatístico. Ela pode ser classificada entre péssima e excelente, como apresenta a Tabela 9, e reflete a qualidade do produto obtido entre ‘completamente inaceitável’ e ‘máxima qualidade’ (LAZIC, 2006).

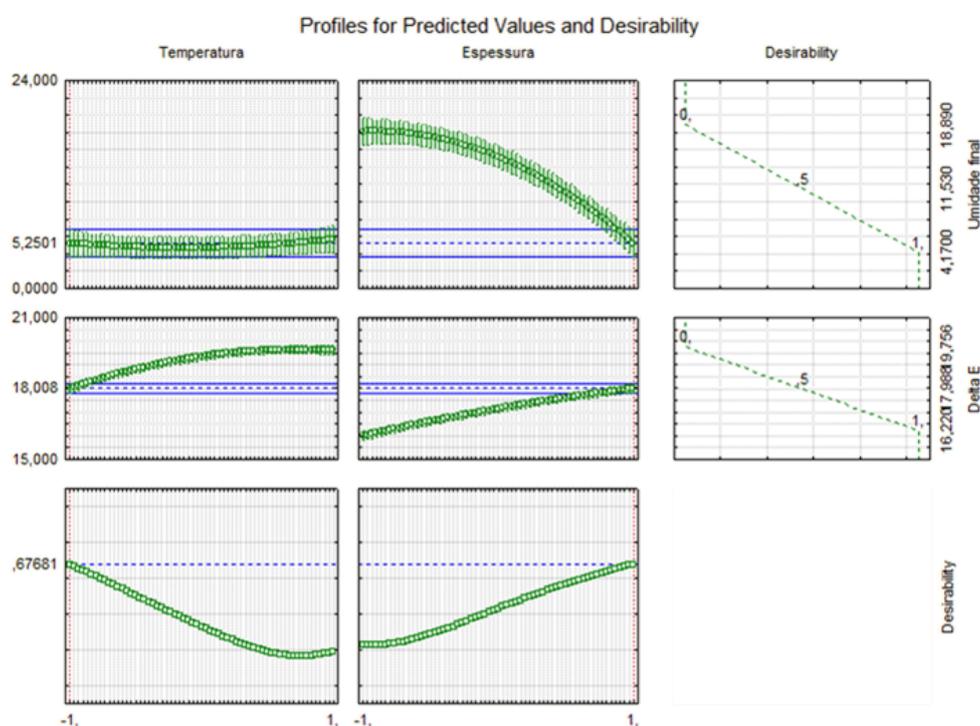
Valor	Desejabilidade
1,0	Excelente
0,80 - 1,0	Muito boa
0,63 - 0,80	Boa
0,37 - 0,63	Satisfatória
0,20 - 0,37	Ruim
0,0 - 0,20	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Lazic (2006).

Como exposto anteriormente, é desejável a minimização da umidade final para que o alimento não sofra deterioração e mantenha-se estável por um período consideravelmente maior. Também é interessante que ele mantenha coloração mais próxima possível ao alimento *in natura*, logo, que a diferença total de cor seja a mínima possível.

Uma vez que somente a umidade final e diferença total de cor sofreram influência com a variação das condições do processo, a deseabilidade foi calculada em relação a essas duas propriedades, como é possível observar na Figura 22. Quanto à densidade da partícula e razão de reidratação, não é possível afirmar o valor exato com confiança estatística pois os modelos ajustados para estas respostas não foram capazes de descrever o comportamento observado visto que, para 95% de confiança, não houve variação significativa das variáveis respostas nas faixas de temperatura e espessura deste estudo.

Figura 22 – Perfil dos valores preditos e deseabilidade.



Fonte: Do autor (2021).

Considerando as múltiplas respostas, as melhores condições de ajuste do processo foram: temperatura do ar de secagem de 50°C e 1,5 cm de espessura de camada de espuma, em coerência com o exposto ao analisar individualmente as variáveis resposta.

O valor obtido na escala de deseabilidade foi de 0,68, valor considerado bom e que significa que a qualidade do produto é aceitável e boa e que representa uma melhoria em relação à qualidade comercial (LAZIC, 2006). Nesta condição, os valores preditos para umidade final e variação global de cor são, respectivamente, 5,25% e 18,01.

## 5. CONCLUSÃO

Através deste estudo foi possível compreender o processo de secagem de folhas e talos de couve em camada de espuma, bem como a influência de diferentes condições de temperatura do ar de secagem e espessura de camada fina no processo e nas características dos produtos.

O Emustab® apresentou um bom desempenho na obtenção de uma espuma adequada para a secagem em camada fina, ao contrário da albumina em pó. A formulação com concentração mássica de 2,5% destacou-se como a melhor dentre as avaliadas devido à notável diminuição da densidade em relação à polpa. Ademais, a espuma foi caracterizada como um fluido não-newtoniano pseudoplástico e comprovou-se estável sob as temperaturas avaliadas. Foi verificada alteração da cor da espuma em relação à polpa, sendo que a primeira mostrou-se mais luminosa e com maior tendência ao verde e ao amarelo. Por fim, o pH das substâncias não apresentou variação significativa.

Quanto à secagem, o modelo de Midilli foi o que melhor descreveu o processo em todas as condições analisadas ( $R^2 \geq 0,994$  e  $SRQ \leq 0,013$ ) e a predominância do período de taxa contante indica que o mecanismo convectivo controla o processo. As variações de temperatura do ar e espessura de camada fina influenciaram a taxa de secagem e, conseqüentemente, o tempo de secagem do material: maiores temperaturas e menores espessuras de camada de espuma resultaram em uma secagem mais rápida. A secagem em camada de espuma mostrou-se eficaz na redução da umidade final do alimento, chegando à valores de até 4,77% (b.s.). Apesar das variações significativas encontradas para  $\Delta E$  dos pós, estes mantiveram uma coloração satisfatória, mantendo a tonalidade verde característica do produto *in natura*. Os valores de razão de reidratação foram satisfatórios e os pós obtidos eram leves, com baixos valores de densidade da partícula e, também, baixos valores de densidade *bulk* aerada e compactada. Por fim, os pós apresentaram alta porosidade *bulk* e escoabilidade ruim a aceitável.

A umidade final e diferença total da cor dos pós foram influenciadas pela variação das condições de secagem, enquanto a densidade da partícula e razão de reidratação não sofreram influência significativa nas faixas estudadas e a 95% de confiança. As condições ótimas de processo são de 50°C e 1,5 cm e os valores preditos para umidade final e diferença total de cor foram 5,25%, e 18,01, respectivamente. Dessa forma, os resultados mostram-se promissores quanto à possibilidade de uma eventual fabricação e comercialização de pós de couve através da secagem em camada de espuma e incorporação deste produto em uma vasta gama de formulações alimentícias.

## REFERÊNCIAS

- ABD KARIM, A.; WAI, C. C. Foam-mat drying of starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree. Stability and air drying characteristics. **Food Chemistry**, v. 64, n. 3, p. 337–343, 1999.
- ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. The use of bulk density measurements as flowability indicators. **Powder technology**, v. 102, n. 2, p. 151–165, 1999.
- ALBINI, G.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Modelagem e simulação da transferência de calor e massa: estudo de caso para secagem de grãos de cevada em leito fixo. **ANAIS DO SIMPÓSIO COMEMORATIVO 40ANOS DA ÁREA DE**, p. 73, 2019.
- ANVISA. **RDC N° 272, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005**, 2005.
- AOAC, A. O. O. A. C. **Official methods of analytical of the Association of Official Analytical Chemists**. 15. ed. [s.l.] Washington, 1990. v. 2
- BAG, S. K.; SRIVASTAV, P. P.; MISHRA, H. N. Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. **Food and bioprocess technology**, v. 4, n. 8, p. 1450–1458, 2011.
- BANJAC, N. et al. Somatic embryogenesis and shoot organogenesis from the hypocotyl slices and free radical scavenging activity of regenerants of collard greens (*Brassica oleracea* L. var. acephala). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 137, n. 3, p. 613–626, 2019.
- BARMORE, M. A. The influence of chemical and physical factors on egg-white foams. **Technical bul.(Colorado Agricultural Experiment Station)**,9, p. 1–58, 1934.
- BATES, R. P. FACTORS AFFECTING FOAM PRODUCTION+ STABILIZATION OF TROPICAL FRUIT PRODUCTS. **Food Technology**, v. 18, n. 1, p. 93, 1964.
- BENÍTEZ, R. O. **Perdas e desperdícios de alimentos na América Latina e no Caribe**. Disponível em: <<http://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/239394/>>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- BIKERMAN, J. J. **Foams**. [s.l.] New York, USA: Springer-Verlag., 1973.
- BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. **São Paulo**, 2005.
- CALADO, V. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica**. [s.l.] Editora E-papers, 2003.
- DANTAS, S. C. DE M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, , 2010.
- DE FREITAS, B. S. M. et al. Physical-chemical characterization of yellow mombin (*Spondias mombin* L.) foam-mat drying at different temperatures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 430–435, 2018.
- DE LISBÔA, C. G. C.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. DE M. Armazenamento de figo-da-índia em pó. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 216–221, 2012.
- DEHGHANNYA, J. et al. Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. **Journal of Food Engineering**, v. 238, p. 164–177, 2018a.

- DEHGHANNYA, J. et al. Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation. **Powder technology**, v. 328, p. 470–484, 2018b.
- FAVELA-GONZÁLEZ, K. M.; HERNÁNDEZ-ALMANZA, A. Y.; DE LA FUENTE-SALCIDO, N. M. The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (Brassica) as antimicrobials and antioxidants: A review. **Journal of Food Biochemistry**, v. 44, n. 10, p. e13414, 2020.
- FERNANDES, T. K. DA S. Secagem em camada de espuma da polpa de cajá. 2010.
- FERRARI, C. C. et al. Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 6, p. 1237–1245, 2012.
- FRANCO, T. S. et al. Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. **LWT-Food Science and Technology**, v. 66, p. 503–513, 2016.
- FRANCO, T. S. et al. Effect of process parameters on foam mat drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and thin-layer drying modeling of experimental data. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 1, p. e12264, 2017.
- GAVA, A. J.; DA SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia de alimentos**. [s.l.] NBL Editora, 2009.
- GERMAN, R. M. **Particle packing characteristics**. [s.l.] Metal Powder Industry, 1989.
- HAMZEH, S. et al. Effects of drying condition on physico-chemical properties of foam-mat dried shrimp powder. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 28, n. 7, p. 794–805, 2019.
- HARDY, Z.; JIDEANI, V. A. Foam-mat drying technology: A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 12, p. 2560–2572, 2017.
- HART, M. R. et al. Foams for foam-mat drying. **Food Technology**, v. 17, n. 10, 1963.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 9 mar. 2022.
- JAKUBCZYKA, E.; GONDEKA, E.; TAMBORB, K. **Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method**. ICEF 11 International Congress on Engineering and Food. **Anais...International Association of Engineering and Food Athens, Greece**, 2011
- JEON, J. et al. Transcriptome analysis and metabolic profiling of green and red kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) seedlings. **Food chemistry**, v. 241, p. 7–13, 2018.
- KANG, U. et al. Chemical constituents of the leaves of *Brassica oleracea* var. *acephala*. **Chemistry of Natural Compounds**, v. 54, n. 5, p. 1023–1026, 2018.
- LAZIC, Z. R. **Design of experiments in chemical engineering: a practical guide**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.
- MANTILLA, S. P. S. et al. Atmosfera modificada na conservação de alimentos. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 8, n. 4, p. 437–448, 2010.

- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. [s.l.] McGraw-hill New York, 1993.
- MITRA, H. et al. Influence of moisture content on the flow properties of basundi mix. **Powder technology**, v. 312, p. 133–143, 2017.
- MONTGOMERY, D. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4. ed. [s.l.] LTC, 2009.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. [s.l.] CRC Press, 2006.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 4. ed. [s.l.] CRC Press, 2014.
- NG, M. L.; SULAIMAN, R. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. **Lwt**, v. 88, p. 80–86, 2018.
- NOVO, M. C. S.; PRELA-PANTANO, A.; DEUBER, R. Caracterização morfológica e da coloração de folhas de couve do banco de germoplasma do Instituto Agrônômico de Campinas. **Infobios, Campinas**, 2011.
- OLIVEIRA, S. M. et al. Effect of Air-Drying Temperature on the Quality and Bioactive Characteristics of Dried *Galega Kale* (*Brassica oleracea* L. var. *Acephala*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 2485–2496, 2015.
- PARK, K. J. B. et al. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93–127, 2014.
- PINTO, M. R. M. R. Obtenção de extratos de carotenoides de polpa de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) encapsulados pelo método de secagem em camada de espuma. 2012.
- 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.
- RAJKUMAR, P. et al. Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1452–1459, 2007.
- SANGAMITHRA, A. et al. Foam mat drying of food materials: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 3165–3174, 2015.
- SARICOBAN, C.; YILMAZ, M. T. Modelling the effects of processing factors on the changes in colour parameters of cooked meatballs using response surface methodology. **World Applied Sciences Journal**, v. 9, n. 1, p. 14–22, 2010.
- SEERANGURAYAR, T. et al. Effect of carrier agents on flowability and microstructural properties of foam-mat freeze dried date powder. **Journal of Food Engineering**, v. 215, p. 33–43, 2017.
- SOUSA, L. M. AVALIAÇÃO DE DENSIDADES BULK DE PÓS EM DIFERENTES ESTADOS DE COMPACTAÇÃO. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 307–311, 2014.
- SOUSA, L. M.; FERREIRA, M. C. Dispositivos Alimentadores para Materiais Particulados e sua Operação com Pós de Escoabilidade Difícil. In: **TÓPICOS ESPECIAIS EM SISTEMAS PARTICULADOS**. [s.l.] Edufscar, 2019a. p. 117–143.
- SOUSA, L. M.; FERREIRA, M. C. Spent coffee grounds as a renewable source of energy: An

analysis of bulk powder flowability. **Particuology**, v. 43, p. 92–100, 2019b.

SOUZA, D. S. et al. Estudo da cinética de reidratação do pó da polpa do abacate liofilizado. **Scientia Plena**, v. 7, n. 6, 2011.

STORCK, C. R. et al. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 537–543, 2013.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Drying characteristics and quality of banana foam mat. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 4, p. 573–583, 2008.

VAN ARSDEL, W. B. COPLEY, C. M. J. **Food Dehydration**. [s.l.] Avi Publishing Company, 1964.

## APÊNDICE A

Tabela A.1 - Parâmetros dos modelos matemáticos de secagem das condições avaliadas

Parâmetro	Ensaio								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Modelo de Lewis</b>									
k	0,017	0,006	0,004	0,028	0,017	0,010	0,064	0,025	0,017
R <sup>2</sup>	0,978	0,947	0,967	0,972	0,966	0,951	0,975	0,964	0,959
SQR	0,048	0,188	0,246	0,043	0,070	0,153	0,032	0,057	0,090
<b>Modelo de Page</b>									
k	0,002	0,0002	0,0001	0,002	0,001	0,0002	0,009	0,001	0,001
n	1,472	1,658	1,707	1,649	1,638	1,821	1,648	1,758	1,790
R <sup>2</sup>	0,993	0,981	0,991	0,996	0,991	0,990	0,997	0,995	0,994
SQR	0,010	0,043	0,052	0,005	0,012	0,020	0,003	0,006	0,009
<b>Modelo de Henderson e Pabis</b>									
a	1,065	1,115	1,124	1,055	1,079	1,124	1,042	1,066	1,097
k	0,018	0,006	0,005	0,029	0,018	0,011	0,066	0,027	0,018
R <sup>2</sup>	0,973	0,935	0,959	0,969	0,959	0,938	0,973	0,960	0,951
SQR	0,042	0,153	0,195	0,039	0,061	0,124	0,030	0,052	0,076
<b>Modelo Logarítmico</b>									
a	1,218	2,215	2,585	1,176	1,344	2,138	1,130	1,244	1,403
c	-0,191	-1,198	-1,569	-0,142	-0,311	-1,103	-0,100	-0,206	-0,355
k	0,012	0,002	0,001	0,021	0,010	0,003	0,052	0,017	0,010
R <sup>2</sup>	0,990	0,994	0,998	0,981	0,986	0,991	0,981	0,978	0,981
SQR	0,012	0,017	0,016	0,019	0,018	0,016	0,018	0,023	0,025