



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
ALIMENTOS

**PATRICK PEREIRA DOS SANTOS**

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DO EXTRATO DE BETERRABA  
EM LEITO DE ESPUMA**

ALEGRE – ES  
MAIO – 2018

PATRICK PEREIRA DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DO EXTRATO DE BETERRABA  
EM LEITO DE ESPUMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos

Orientador: Dr. Sérgio Henriques Saraiva  
Coorientador: Dr. Luciano José Quintão Teixeira

ALEGRE – ES

MAIO – 2018

S237o Santos, Patrick Pereira dos, 1993-  
Otimização do processo de secagem do extrato de beterraba em  
leito de espuma. – 2018.  
81 f. : il.

Orientador: Sérgio Henriques Saraiva.

Coorientador: Luciano José Quintão Teixeira.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e  
Engenharias.

1. Alimentos – Desidratação. 2. Secagem em leito de espuma. 3.  
Extrato vegetal. I. Saraiva, Sérgio Henriques. II. Teixeira, Luciano José  
Quintão. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de  
Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

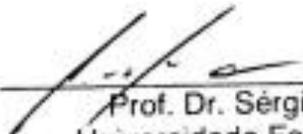
CDU: 664

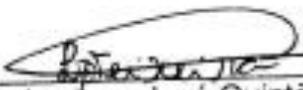
PATRICK PEREIRA DOS SANTOS

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DO EXTRATO DE  
BETERRABA EM LEITO DE ESPUMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Aprovada em 10 de maio de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luciano José Quintão Teixeira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antonio Manoel Maradini Filho  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela sua bondade, proteção e sabedoria, por não ter desistido de mim e por ter guiado cada passo meu desde a minha infância. Por ser quem eu sou e por tudo que superei na vida, eu te agradeço, meu Deus. Tudo é possível com fé em Deus.

À minha família (Claudecir, Erly, Pablo e Pietro) e familiares, que sempre esteve comigo nos momentos bons e ruins, me incentivaram e me apoiaram em todos os meus planos e sonhos. Seus carinhos foram combustíveis para querer ir sempre além das minhas limitações.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao programa de Pós-Graduação na figura dos grandes professores que transmitiram seus conhecimentos e me capacitaram na academia, como profissional e pesquisador. A Fapes pelo apoio financeiro. Minha sincera gratidão!

Ao meu orientador, Sérgio Henriques Saraiva, pela capacidade de orientação que não seria possível a realização deste trabalho, pelos seus ensinamentos, paciência que teve comigo, confiança, dedicação, compreensão, atenção e amizade. Muito obrigado!

Aos professores Luciano José Quintão Teixeira e Antônio Manoel Maradini Filho, por aceitarem o convite de participarem da defesa, pela amizade, pelos auxílios e sugestões, meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos Laudiane Sant'anna, Bruno Siqueira, Raphael Maximino e Natássia Guimarães pela força que me deram durante todo esse período.

A minha namorada Natiele pelo carinho, incentivo, força e paciência.

## SUMÁRIO

### RESUMO

<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
3.1 Beterraba .....	4
3.2 Secagem.....	7
3.3 Secagem em leite de espuma .....	11
3.3 Cinética de secagem .....	13
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	15
4.1 Pré-processamento.....	15
4.2 Otimização das concentrações dos agentes espumantes .....	16
4.3 Otimização da temperatura de secagem .....	19
4.4 Caracterização e produção da espuma .....	19
4.4.1 Massa específica e estabilidade.....	20
4.5 Secagem em leite de espuma .....	20
4.6 Análises físico-químicas dos pós desidratados em leite de espuma .....	22
4.6.1 Atividade de água.....	22
4.6.2 Solubilidade.....	22
4.6.3 Tempo de molhabilidade .....	23
4.6.4 Análise do teor de água .....	23
4.6.5 Rendimento de recuperação .....	23
4.6.6 Atividade antioxidante (ABTS).....	24
4.6.7 Análise de cor .....	24
5.1 Otimização das concentrações dos agentes espumantes .....	26

5.1.1 Massa específica e estabilidade das espumas .....	26
5.1.2 Curvas de secagem dos extratos de beterraba em leito de espuma a 60°C.....	29
5.1.3 Solubilidade.....	34
5.1.4 Tempo de molhabilidade .....	36
5.1.5 Rendimento de recuperação .....	38
5.1.6 Teor de água.....	40
5.1.7 Otimização das concentrações dos agentes espumantes pela função desejabilidade .....	43
5.2 Otimização da temperatura do ar de secagem .....	44
5.2.1 Curvas de secagem dos extratos de beterraba em diferentes temperaturas.....	44
5.2.2 Solubilidade.....	48
5.2.3 Tempo de molhabilidade .....	49
5.2.4 Teor de água.....	50
5.2.5 Atividade de água.....	51
5.2.6 Cinética do consumo de energia.....	53
5.2.7 Parâmetros instrumentais de cor.....	56
5.2.8 Atividade antioxidante (ABTS).....	57
5.2.9 Otimização da temperatura de secagem pela função desejabilidade .....	57
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Curva típica de secagem. Fonte: Adaptado de PARK; YADO; BROD, 2001. ....	10
Figura 2- Pré-processamento da beterraba crua utilizado no experimento. Fonte: Autor (2018) .....	15
Figura 3- Fluxograma das etapas de formação da espuma de beterraba. Fonte: Autor (2018). ....	16
Figura 4- Divisões das etapas experimentais. Fonte: Autor (2018).....	16
Figura 5- Batedeira planetária doméstica. Fonte: Autor (2018).....	20
Figura 6- Bandeja contendo a espuma de beterraba utilizada na estufa. Fonte: Autor (2018).....	21
Figura 7- Medidor de atividade de água. Fonte: Autor (2018).....	22
Figura 8- Espectrofotômetro modelo nova 1800 UV. Fonte: Autor (2018). ....	24
Figura 9- Colorímetro Komica Minolta. Fonte: Autor (2018).....	25
Figura 12- Curvas de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba na temperatura de 60 °C em diferentes concentrações de agentes espumantes. MD: Concentração de maltodextrina; EM: Concentração de Emustab®. ....	30
Figura 16- Curvas de nível da variável resposta rendimento de recuperação em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ). ....	40
Figura 17- Curvas de nível da variável resposta teor de água em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ). ....	42
Figura 18- Curvas de nível da desejabilidade global em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ). ....	44
Figura 19- Curvas de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba em diferentes temperaturas do ar de secagem utilizando-se 2,4% de maltodextrina e 7,44% de emustab®. ....	45
Figura 20- Tempo de secagem em leito de espuma dos extratos de beterraba em função das diferentes temperaturas do ar de secagem. ....	48
Figura 21- Tempo de molhabilidade do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem. ....	50
Figura 22- Teor de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem. ....	51
Figura 23- Atividade de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem ....	53
Figura 24- Cinética do consumo de energia do processo de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba em diferentes temperaturas do ar de secagem. ....	54
Figura 25- Consumo de energia em função da temperatura do ar de secagem. ....	56
Figura 26- Desejabilidade global em função da temperatura do ar para o processo de secagem em leito de espuma de extrato de beterraba. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição da beterraba crua por 100 gramas de parte comestível: Centesimal, minerais e vitaminas.....	5
Tabela 2- Delineamento Composto Central Rotacional – Valores das variáveis fixas codificadas ( $c_1$ e $c_2$ ) e não codificadas (% m/m Maltodextrina e % m/m Emustab®) 17	17
Tabela 3- Modelos ajustados e coeficientes de determinação para as respostas massa específica e estabilidade.....	26
Tabela 4- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para a massa específica. ....	26
Tabela 5- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para a estabilidade .....	27
Tabela 6- Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos ajustados em diferentes concentrações de agentes espumantes. ....	31
Tabela 7- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do tempo de secagem das espumas.....	33
Tabela 8- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo da solubilidade do extrato de beterraba desidratado.....	35
Tabela 9- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do tempo de molhabilidade do extrato de beterraba desidratado.....	36
Tabela 10- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do rendimento de recuperação de secagem do extrato de beterraba. ....	39
Tabela 11- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do teor de água do extrato de beterraba desidratado. ....	41
Tabela 12- Valores limite das variáveis resposta utilizadas na função desejabilidade .....	43
Tabela 13- Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos ajustados em diferentes temperaturas do ar de secagem utilizando-se 2,4% de maltodextrina e 7,44% de emustab®.....	46
Tabela 14- Tempos de secagem calculados pelo modelo de Midili para as diferentes temperaturas testadas.....	47
Tabela 15- Análise de variância para a resposta solubilidade. ....	48
Tabela 16- Análise de variância para a resposta tempo de molhabilidade .....	49
Tabela 17- Análise de variância para a resposta teor de água .....	50
Tabela 18- Análise de variância para a resposta atividade de água .....	52
Tabela 19- Parâmetros estimados e coeficiente de determinação para os modelos ajustados para o consumo de energia em diferentes temperaturas do ar de secagem .....	54
Tabela 20- Consumos de energia calculados pelo modelo da Equação 23 para as diferentes temperaturas testadas. ....	55
Tabela 21- Análise de variância para os parâmetros instrumentais de cor dos extratos de beterraba desidratados.....	56
Tabela 22- Análise de variância para a resposta atividade antioxidante (ABTS) .....	57
Tabela 23- Valores limite das variáveis resposta utilizadas na função desejabilidade. ....	57

## RESUMO

SANTOS, Patrick Pereira. **Otimização do processo de secagem do extrato de beterraba em leite de espuma.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Henriques Saraiva. Coorientador: Prof. Dr. Luciano José Quintão Teixeira.

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) pertence à família Chenopodiaceae é fonte de minerais, vitaminas e rica em antioxidantes, destacando-se por sua coloração vermelha característica. A coloração vermelha é devido à presença das betalainas, que são pigmentos hidrossolúveis. O objetivo do presente estudo foi otimizar o processo de secagem em leite de espuma do extrato aquoso de beterraba. Na primeira etapa foram otimizadas as concentrações dos agentes espumantes maltodextrina e Emustab®. Para isso, foi utilizado o delineamento composto central rotacional (DCCR), com as concentrações dos agentes variando de 0 a 8%, avaliando a influência desses dois fatores sobre as respostas: massa específica e estabilidade da espuma, solubilidade, teor de água e tempo de molhabilidade do extrato seco, rendimento de recuperação e tempo de secagem. Para otimização simultânea das sete variáveis respostas, foi utilizada a função desejabilidade. A condição ótima foi nas concentrações de 2,4% de maltodextrina e 7,44% de Emustab®. Na segunda etapa foi otimizada a temperatura de secagem da espuma obtida de acordo com a condição ótima da primeira etapa. Para isso, foram testados cinco níveis da temperatura de secagem (40, 50, 60, 70 e 80°C) e foi avaliado o efeito desse fator sobre as respostas (tempo de secagem, tempo de molhabilidade, atividade de água e consumo de energia). Para otimização simultânea das quatro variáveis, também se utilizou a função desejabilidade. A condição ótima foi na temperatura de 60,96°C. Nas duas etapas foram avaliadas as cinéticas de secagem em leite de espuma do extrato de beterraba, verificando o ajuste dos modelos de Lewis, Henderson e Pabis, Page e Midili. O modelo de Midili foi o que apresentou o melhor desempenho em todos os tratamentos testados, pois foi o que apresentou os maiores valores de coeficiente de determinação ajustado e os menores valores de erro padrão da regressão.

**Palavras-Chaves:** Beterraba, otimização, secagem em leite de espuma, DCCR, função desejabilidade.

## ABSTRACT

SANTOS, Patrick Pereira. **Optimization of the drying process of the beet extract in foam mat.** 2018. Dissertacion (Scientiae Magister in food science and technology) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES. Advisor: D.Sc. Sérgio Henriques Saraiva. Coadvisor: D.Sc. Luciano José Quintão Teixeira.

Beet (*Beta vulgaris* L.) belongs to Chenopodiaceae family and is a source of minerals, vitamins and rich in antioxidants, notable for its characteristic red color. This red color is the result of the presence of the betalains, water soluble pigments. The objective of the present study was to optimize the drying of aqueous beet extract by foam mat drying process. In a first step concentrations of the foaming agents maltodextrin and Emustab® were optimized. For this, a Central Composite Rotational Design (CCRD) was used, with concentrations of the two agents varying from 0 to 8%, evaluating the influence of these two factors on the responses: specific mass and foam stability, solubility, water content and time wettability of the dried extract, process yield and drying time. For the simultaneous optimization of these seven response variables, the desirability function was used. The optimum condition is expected at the concentrations of 2.4% maltodextrin and 7.44% Emustab®. In a second step the drying temperature of the obtained foam according to the optimum condition of the first step was optimized. For this, five levels of the drying temperature were tested, ranging from 40°C to 80°C, evaluating the effect of this factor on the responses drying time, time wettability, water activity and energy consumption. For the simultaneous optimization of these four variables, it was also used the desirability function. The optimal condition is predicted at the temperature of 60.96°C. In both stages, the drying kinetics of beet extract foam were evaluated, comparing Lewis, Henderson and Pabis, Page and Midili models. The Midili model was the one that presented the best performance in all tested treatments, since it was the one that presented the highest values of adjusted coefficient of determination and the lowest values of standard error of the regression.

**Keywords:** Beet, optimization, foam mat drying, DCCR, desirability function.

## 1. INTRODUÇÃO

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) é uma hortaliça que possui diversos biótipos, sendo que três deles destacam-se pela relevância econômica. Os principais biótipos são as beterrabas açucareiras, forrageiras e hortícolas. A beterraba hortícola, também denominada beterraba vermelha ou beterraba de mesa, é o biótipo mais cultivado. As beterrabas de mesa podem ser consumidas cruas ou cozidas, utilizadas como base para bebidas, sucos, vitaminas, saladas, etc (TIVELLI et al., 2011).

Devido aos benefícios para a saúde e segurança dos consumidores, nos últimos anos os corantes naturais têm sido preferidos em relação aos corantes sintéticos. Pigmentos naturais são menos estáveis e possuem custo mais elevado do que os corantes sintéticos, porém, por não apresentar toxicidade e trazer benefícios à saúde, além das funções tecnológicas e utilização, os corantes naturais estão atraindo cada vez mais consumidores que buscam uma vida mais saudável (CAI; SUN; CORKE, 2005).

A betalaína é um pigmento natural encontrada na beterraba, responsável pela coloração avermelhada do vegetal e se destaca como corante em alimentos (STRACK; VOGT; SCHLIEMANN; 2003). Vários estudos apontam que as betalaínas contém elevada atividade antioxidante. Dessa forma, o consumo regular de beterraba poderá fornecer prevenção contra doenças relacionadas ao estresse oxidativo (KANNER; HAREL; GRANIT, 2001; CAI; SUN; CORKE, 2003) como a obesidade (ZIELINSKA-PRZYEMSKA et al., 2009) e a quimioprevenção de alguns tipos de câncer (KAPADIA et al., 2003).

O extrato de beterraba pode ser utilizado em produtos alimentares, tais como iogurtes, sorvetes, molhos para salada, coberturas prontas, misturas para bolo, pães, biscoitos, misturas para bebidas em pó, misturas para molho, refrigerantes e sobremesas de gelatina, de acordo com a legislação vigente que regulamenta a adição, por meio da Resolução de nº 388 (BRASIL, 1999).

As operações que envolvem o processo de desidratação são importantes nas indústrias de processamento de alimentos. A necessidade de aumentar a vida útil dos alimentos por longos períodos estimulou o desenvolvimento de vários processos tecnológicos, incluindo a desidratação de alimentos. Esta operação é uma das mais antigas registradas para a conservação de alimentos e consiste na perda de água

livre presente nos alimentos através do uso de calor ou outros meios. O objetivo principal da secagem de produtos alimentícios é a remoção de água até um nível desejável, em que a deterioração microbiana e as reações químicas de deterioração se tornam mínimas, uma vantagem do alimento que passou pelo processo de secagem é que o produto não precisa de refrigeração durante o armazenamento e transporte. Os tipos de secagens de alimentos sofreram alterações ao longo do tempo através de pesquisas e desenvolvimento afim de melhorar parâmetros tais como a qualidade e conservação de alimentos, aspectos sensoriais, tempo de secagem, reidratação do produto e economia.

A secagem por meio de leito de espuma é uma técnica em que os alimentos líquidos são convertidos em espuma através de agentes espumantes e incorporação de ar por meio da agitação. O produto final, após a secagem, é poroso e quebradiço, facilmente triturado para transformação em pó. Esta técnica tem a vantagem de diminuir os custos operacionais pois o tempo de secagem é menor e emprega-se baixas temperaturas do ar de secagem quando comparado com a secagem em leito fixo tradicional (SILVA et al., 2008; FELLOWS, 2000; FRANCIS, 1999).

Por ser um processo simples e barato, a secagem em leito de espuma oferece grandes possibilidades comerciais, especialmente para alimentos sensíveis à temperatura. Vem sendo aplicado em diversos produtos como: manga (BASTOS et al., 2005), tamarindo (GURJÃO, 2006), jaca (DANTAS et al., 2008), maracujá (CAMARGO et al., 2008), caldo de cana (MARQUES, 2009), araçá-boi (SOARES, 2009), ceriguela (FURTADO et al., 2010), cupuaçu (SOUZA, 2011), suco misto de açaí, morango e acerola (ROCHA, 2013), entre outros.

Assim, o processo de secagem em leito de espuma pode ser uma alternativa como método de obtenção do extrato de beterraba desidratado. Para que o processo seja mais efetivo, devem ser avaliadas as condições ótimas de processamento com relação à etapa de formação da espuma e também em relação à temperatura de secagem.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Otimizar o processo de secagem em leito de espuma do extrato aquoso de beterraba.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar o efeito das concentrações de maltodextrina e Emustab® sobre as propriedades físicas da espuma e físico-químicas dos pós obtidos por secagem por leito de espuma;
- Avaliar a cinética de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba;
- Obter as condições ótimas do processo de secagem com relação à adição dos agentes espumantes maltodextrina e Emustab®;
- Avaliar o efeito da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas e físico-químicas dos pós obtidos por secagem por leito de espuma;
- Obter a condição ótima do processo de secagem com relação à temperatura do ar de secagem.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Beterraba

A beterraba é uma hortaliça da família das Chenopodiaceae, originária das regiões de clima temperado da Europa e Norte da África, no qual seu ciclo vegetativo leva aproximadamente três meses e meio (FERREIRA, 2010).

Esta hortaliça pertence à espécie *Beta vulgaris* L. que é dividida em três subespécies: *Beta vulgaris ssp. adanesis*, *Beta vulgaris ssp. marítima* e *Beta vulgaris ssp. vulgaris*, sendo que esta última agrupa todas as cultivares já domesticadas (VITTI et al., 2004; FERREIRA et al., 2009). As *Beta vulgaris ssp. vulgaris* são subdivididas em quatro grupos: i) beterrabas açucareiras (*Sugar Beet Group*), que apresentam coloração branca e são cultivadas na América do Norte e na Europa para o processamento de açúcar e álcool; ii) beterrabas folhosas (*Leaf Beet Group*), em que as partes comestíveis são as folhas e os pecíolos, pois suas raízes não exibem diâmetro significativamente aumentado; iii) beterrabas forrageiras (*Fodder Beet Group*), empregada na pecuária para alimentação de animais; e iv) beterrabas hortícolas (*Garden Beet Group*), que apresentam uma parte tuberosa comestível, sendo o principal grupo cultivado para fins comerciais no Brasil. Fazem parte deste último grupo as beterrabas vermelhas (*Early Wonder*) (LANGE; BRADENBURG; BOCK; 1999; HERNANDES et al., 2007).

No Brasil, a beterraba é cultivada principalmente nas regiões Sudeste e Sul, por causa dessas regiões apresentarem temperaturas amenas a frias, propícia para o cultivo desse tubérculo (FERREIRA, 2010). Conforme o Censo Agropecuário (IBGE, 2009), em 2006 existiam 21.937 estabelecimentos agrícolas que produziam 177.154 toneladas de beterraba. Os cinco principais Estados produtores totalizavam mais de 75% da quantidade produzida do país. Esses Estados são: Paraná que concentra a maior produção (20,0%), São Paulo (17,0%), Minas Gerais (15,5%), Rio Grande do Sul (15,0%) e Bahia (8,0%). A beterraba é uma das 18 hortaliças propagadas por sementes mais importantes no Brasil, segundo levantamento realizado pela Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudas – ABCSEM. Os produtores de beterraba movimentam 192 milhões de Reais por ano. No varejo, o valor da cadeia produtiva desta hortaliça atingiu 618,8 milhões de Reais

em 2012. O cultivo de beterraba em nosso país representou 1,35% do mercado de hortaliças em 2012 (ABCSEM, 2012).

A Tabela 1 apresenta a composição da beterraba crua. Ela é uma boa fonte de minerais. Quando cozida, a composição de nutrientes pode ser bastante alterada. A beterraba é frequentemente recomendada em dietas de restrição calórica devido ao seu baixo valor calórico. As beterrabas de mesa são ricas em antioxidantes biologicamente acessíveis e contém outros compostos primordiais para a saúde humana, tais como potássio, magnésio, ácido fólico, ferro, zinco, cálcio, fósforo, sódio, niacina, biotina, vitamina B6 e fibras solúveis (SCOTT; REBELLE; FLETCHER, 2000; SANTOS, 2017).

Tabela 1- Composição da beterraba crua por 100 gramas de parte comestível: Centesimal, minerais e vitaminas.

<b>Componente</b>	<b>Quantidade</b>
Água (%)	86
Calorias (kcal)	49
Proteína (g)	1,9
Carboidrato (g)	11,1
Fibra Alimentar (g)	3,4
Cinzas (g)	0,9
Lipídios (g)	0,1
Cálcio (mg)	18
Magnésio (mg)	24
Manganês (mg)	1,23
Fósforo (mg)	19
Ferro (mg)	0,3
Potássio (mg)	375
Sódio (mg)	10
Cobre (mg)	0,08
Zinco (mg)	0,5
Tiamina (mg)	0,04
Piridoxina (mg)	0,04
Vitamina C (mg)	3,1

Fonte: (TACO, 2011)

Georgiev et al. (2010) identificaram os compostos fenólicos ácido 4-hidroxibenzóico, ácido clorogênico, ácido caféico, hidrato de catequina e epicatequina em extratos de beterraba. Wootton-Beard e Ryan (2011) afirmam que o consumo de polifenóis acarreta em múltiplos benefícios à saúde e sugerem a ingestão de suco de beterraba como fonte de compostos fenólicos.

Webb et al. (2008) realizaram estudos onde utilizaram o suco de beterraba e investigaram o efeito da digestão do vegetal em homens adultos e concluíram que houve uma redução na pressão sanguínea e efeitos vaso protetores.

Além de todos os benefícios provenientes da composição nutricional da beterraba vermelha e da presença dos compostos fenólicos, os pigmentos naturais presentes nesta raiz tuberosa são, também, componentes funcionais, apresentando aplicação na indústria alimentícia. Os pigmentos naturais responsáveis pela coloração vermelho-violeta da beterraba são as betalaínas, metabólitos secundários com uma estrutura química diferente dos pigmentos de antocianina devido à presença de dois átomos de nitrogênio nas moléculas (STRACK; VOGT; SCHLIEMANN, 2003; STINTZING e CARLE, 2007; TIVELLI et al., 2011).

Os pigmentos naturais são muito pesquisados devido ao seu potencial de aplicação e aos benefícios à saúde humana. As betalaínas são uma família de pigmentos presentes em plantas da ordem Centrospermae (*Caryophyllales*), são hidrossolúveis e encontradas como betacianinas (vermelho violeta) e betaxantinas (amarelo) (ESCRIBANO et al., 2002; SANTOS, 2017). A fonte mais comum de betalaínas é a beterraba vermelha (*Beta Vulgaris* L.), que tem a betanina, um tipo de betacianina, como a betalaína majoritária (MANCHALI et al., 2012).

Apesar de apresentarem colorações semelhantes às plantas que possuem antocianinas, diferentemente destas, a coloração dos compostos ricos em betalaínas não é afetada pelo pH do meio. A estabilidade da coloração em um meio com pH no intervalo entre 3 e 7 torna adequada a aplicação de betalaínas para uma ampla faixa de alimentos ácidos e neutros. Logo, as betalaínas podem ser uma alternativa para substituir as antocianinas como corante natural em uma vasta gama de produtos (STINTZING e CARLE, 2007; AZEREDO, 2009; GONÇALVES et al., 2015).

A beterraba é uma cultura de importância comercial (WOO et al., 2011), uma vez que seus pigmentos são amplamente utilizados como corantes naturais em alimentos, arte decorativa, pinturas, cosméticos e medicamentos tradicionais (SNOW, 1983; PIERONI et al., 2005; CHATTOPADHYAY; CHATTERJEE; SEN, 2008; KAPOOR et al., 2008; SHAHID e MOHAMMAD, 2013; ESATBEYOGLU et al., 2015; SAINATH, 2016; KUMAR e BROOKS, 2018).

As indústrias de alimentos exploram comercialmente o uso de pigmentos da beterraba para melhorar a cor de alimentos, como produtos lácteos (iogurte, sorvete,

leite, kefir), molhos, sopas, doces, panificados, cereais e produtos cárneos (salsichas defumadas, cozidas, fermentadas ou semi-secas) (PASCH et al., 1975; CAI e CORKE 1999; CAI; SUN; CORKE, 2005; BANDYOPADHYAY et al., 2007; AZEREDO, 2009; SINGH e HATHAN, 2014; KUMAR e BROOKS, 2018). A indústria farmacêutica também usa pigmentos de beterraba vermelha como agentes colorantes em formulações de drogas líquidas e sólidas (PAI e D'MELLO, 2004).

As betalaínas possibilitam outras vantagens, além da coloração vermelha, pois possuem atividades antioxidantes, anti-inflamatórias, antimicrobiana, hepatoprotetoras e propriedades antitumorais (GEORGIEV et al., 2010; GENGATHARAN; DYES; CHOO, 2015). As beterrabas contêm quantidades significativas de betalaína e compostos fenólicos, bem como ácido ascórbico, todos conhecidos por serem biologicamente ativos (KUMAR e BROOKS, 2018).

Os corantes comerciais de beterraba estão disponíveis em soluções concentradas ou na forma de pó, produzidos a partir da extração da beterraba. Para transformar em pó, contendo de 0,3 a 1% de pigmentos, geralmente os extratos são secos por liofilização ou atomização. A cor dos pós tem uma coloração vermelha forte e em solução a coloração é vermelho-violeta, possuindo sensibilidade às variações de temperatura e luz (CEREZAL; PINO; SALABARRIA, 1994; CEREZAL e NUÑEZ, 1996).

### **3.2 Secagem**

A secagem é umas das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para a preservação de alimentos. Ela consiste na redução da atividade de água dos alimentos pelo processo de remoção da água presente no interior dos mesmos. Esta técnica vem sendo estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade e menor tempo de processamento (AKPINAR; BICER; YILDIZ, 2006; MACHADO, 2009).

Em relação a outros métodos de conservação por períodos longos como a refrigeração, tratamento térmico ou tratamentos químicos, a desidratação oferece custo mais baixo e operações mais simples. A remoção de água diminui a atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de microrganismos e retardando deteriorações de origem físico-química (CANO-CHAUCA et al., 2004).

As frutas e hortaliças caracterizam-se pelo alto teor inicial de água, sendo considerados produtos perecíveis. Portanto, o processo de secagem implica em considerável redução de custo em transporte e manipulação do produto, além de proporcionar efetivo prolongamento de sua vida útil (CANO-CHAUCA et al., 2004; MACHADO, 2009).

A secagem de vegetais por convecção forçada de ar aquecido estabelece dois processos que ocorrem simultaneamente: movimento de água do interior para a superfície e transferência de água superficial para o ar e, devido ao gradiente de pressão de vapor d'água entre as duas regiões (VILLELA, 1991; MORAES, 2000). A secagem de produtos agrícolas consiste em remover grande parte da água inicialmente contida no produto, a um nível máximo de umidade no qual possa ser armazenado em condições ambientais durante longos períodos, sem perdas de suas propriedades nutricionais e organolépticas (sabor e aroma). Tal efeito é conseguido pela criação de condições desfavoráveis ao desenvolvimento de microrganismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas (FIOREZE, 2004).

A secagem é um processo de remoção de umidade de um material que envolve o mecanismo de transferência combinada de calor e massa (HAWALDER; PERERA; TIAN, 2006). A secagem proporciona as vantagens de períodos de armazenamento mais longos, redução de volume e também os pós obtidos por secagem de sucos de frutas concentrados ou polpas são ingredientes naturais estáveis que podem ser convenientemente manipulados para o desenvolvimento de alimentos formulados (CABRAL et al., 2007). A desidratação é um termo amplo referente à remoção de água de um produto por um processo qualquer, exceto pela operação unitária de evaporação. A temperatura, tempo de residência e a umidade relativa do ar de secagem são parâmetros que devem ser estudados com o intuito de reduzir o tempo de secagem (MACHADO, 2009; BARBOSA et al, 2009).

Segundo Chen e Munjumdar (2008), existem vários métodos ou processos para secar alimentos. Em geral, o processo de secagem de material alimentar ocorre quando o vapor de água é removido de sua superfície no espaço circundante, resultando em uma superfície com baixo teor de água, gerando um gradiente de umidade, no interior do alimento. Isso faz com que a pressão de vapor d'água no

interior do alimento seja maior que na sua superfície, fazendo com que o vapor d'água migre do interior para a superfície.

De acordo com Geankoplis (2003), a secagem diferencia da evaporação na forma de remoção de água. Na evaporação a remoção do vapor de água ocorre à temperatura igual ou acima do ponto de ebulição da água. Na secagem, a água quase sempre é removida como vapor com o alimento abaixo da temperatura de ebulição.

Em geral os processos de secagem sofrem influência considerável de agentes externos e da estrutura interna do material (MACHADO, 2009). Segundo Fellows (2000), há três fatores inter-relacionados que governam a capacidade do ar para remover a água de um alimento: quantidade de vapor de água presente no ar, temperatura de secagem e a quantidade e velocidade de ar que passa sobre os alimentos. O alimento absorve calor do ar quente, o que provê a entalpia de vaporização necessária para evaporar a água, a qual será carregada pelo ar de secagem.

A partir dos dados da secagem, é possível construir curvas de secagem características de cada produto. A utilização de modelos matemáticos para ajustá-los aos dados experimentais tem mostrado grande importância na prática, pois permite a redução dos exaustivos ensaios de laboratório. Existem na literatura vários modelos matemáticos, teóricos, semi-empíricos e empíricos que podem ser empregados (WAUGHON e PENA, 2008).

Segundo Cano-Chauca et al. (2004), as curvas de secagem podem auxiliar na escolha do tempo de secagem para a obtenção de um produto com umidade adequada para um produto de boa qualidade.

O processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos (PARK; YADO; BROD, 2001; PINEDO, 2003), como ilustrado na Figura 1.

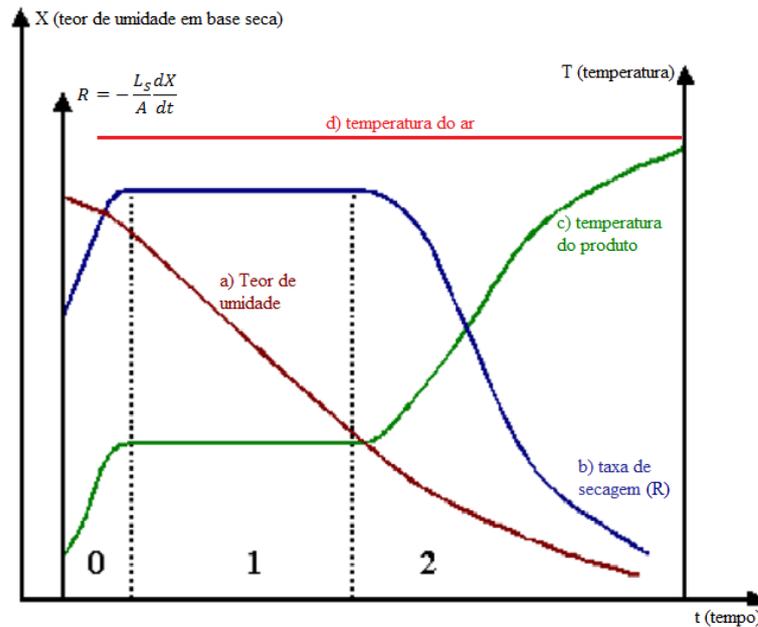


Figura 1- Curva típica de secagem. Fonte: Adaptado de PARK; YADO; BROD, 2001.

A região 0 da Figura 1 representa o período de aquecimento onde o material se encontra a uma temperatura inferior à temperatura de secagem, ou seja, é o período de secagem em regime não permanente. O período de taxa constante, região 1 da Figura 1, é considerado importante quando o potencial do ar de secagem é baixo ou a umidade do material é alta. Neste período a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. Ou seja, a taxa de secagem independe do teor de umidade do sólido. A região 2 inicia-se com o término do período de taxa constante e ocorre quando o sólido alcança o teor de umidade crítico. A partir deste ponto a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem diminui rapidamente (PARK; YADO; BROD, 2001; GEANKOPLIS, 2003; PINEDO, 2003).

A alta temperatura do processo de secagem é uma causa importante de perda de qualidade. Reduzir a temperatura do processo tem um grande potencial para melhorar a qualidade dos produtos secos (NINDO et al., 2003; BEAUDRY et al., 2004). No entanto, em tais condições, o tempo de operação e o custo associado tornam-se inviáveis. Para reduzir o custo operacional, diferentes pré-tratamentos e novos métodos de secagem utilizando baixa temperatura e energia foram desenvolvidos. Hertzendorf e Moshy (1970) revisaram a aplicação da secagem de leite de espuma a muitos materiais alimentares sensíveis ao calor, incluindo sucos de frutas desidratados.

A secagem de frutas e vegetais é feita principalmente por convecção (NIJHUIS et al., 1998). Existem uma série de estudos que têm abordado os problemas associados com a secagem por convecção convencional. Algumas propriedades físicas importantes dos produtos mudam por conta desse processo como perda de cor (CHUA et al., 2000), mudança de textura, mudanças químicas que afetam o sabor e os nutrientes e o encolhimento (MAYOR e SERENO, 2004). A secagem utilizando ar quente é considerada como o processo mais simples, econômico e amplamente utilizada, especialmente nos países em desenvolvimento. Os principais problemas associados à secagem, no entanto, são o considerável encolhimento causado pelo colapso celular após a perda de água, dificuldade de reidratação dos produtos secos e as mudanças desfavoráveis na cor, textura, sabor e a perda de alguns atributos nutritivos causados pela secagem. Outra desvantagem é o uso intenso de energia e o custo energético combinado com o tempo é relativamente alto em relação a outros métodos de conservação (MAZZA, 1983; BRENNAN, 2006).

Há vários tipos de secadores que podem ser classificados em relação ao método de fornecimento de calor, ao tipo de equipamento de secagem, ao método de transporte do produto, à condição e à natureza da alimentação, às condições de operação e ao tempo de residência do produto as condições de secagem (VALENTAS; ROTSTEIN; SINGH, 1997).

Conforme Sagar e Kumar (2010), para a seleção do método de secagem necessita-se observar alguns fatores, tais como: características físicas e químicas do produto, disponibilidade do secador, custos de secagem e finalidade do produto desidratado.

### **3.3 Secagem em leite de espuma**

A história da secagem em leite de espuma remonta a 1917, quando a Campbell Food Company (CAMPBELL, 1917) patenteou um método para a secagem de leite evaporado em espuma, citado por Kudra e Ratti (2006), seguido de patentes para a secagem de clara de ovo em espuma (MINK, 1939 e 1940), e melhorada por Morgan (1961) e colegas de trabalho. Ao longo da última década, essa tecnologia relativamente antiga recebeu uma nova atenção e foi aplicada em

muitas frutas e outros alimentos, incluindo goiaba, maçã, extrato de café, acerola (SOARES et al., 2001), manga (RAJKUMAR et al., 2007; KADAM; WILSON; KAUR, 2010), ovo, leite de soja (AKINTOYE e OGUNTUNDE, 1991), abacaxi (HASSAN e AHMED, 1998), carambola (KARIM e WAI, 1999), banana (SANKAT e CASTAIGNE, 2004), suco de tomate (KADAM e BALASUBRAMANIAN, 2011).

A espuma é um sistema com duas fases (fase dispersa e contínua) separada por uma camada líquida de película fina conhecida como fase laminar (parede de bolha fina). No caso de alimentos e bebidas, a espuma é um sistema complexo formado por gases, líquidos, sólidos e surfactantes (EISNER et al., 2007). As espumas têm bolhas de gás cercadas pela borda de limite. O desenvolvimento da espuma é um passo importante para compreender os fatores que contribuem para a sua formação ou coalescência. Tais fatores incluem a quantidade, o tamanho e a distribuição das bolhas, que determinam a textura da espuma. As pequenas bolhas uniformemente distribuídas resultam em espumas mais macias. As espumas acumulam-se na interface ar-líquido, mas são naturalmente instáveis porque a tensão superficial vai contra as forças necessárias para sua manutenção e estabilidade, o que leva ao colapso das bolhas associadas à espuma (EISNER et al., 2007).

O método de secagem em espuma foi desenvolvido como resultado do desejo de aumentar a taxa de secagem de alimentos líquidos e semilíquidos. A secagem em espuma envolve a incorporação de agente espumante em alimentos líquidos com agitação para subsequente formar uma espuma rígida (MORGAN et al., 1961; HART et al., 1963). A espuma é então espalhada sobre uma superfície, utilizando-se geralmente camada com espessura em torno de 2 a 5 mm e seca numa corrente de ar quente. A secagem do material espumoso permite uma alta velocidade de secagem devido à estrutura aberta da espuma. Este processo tem propriedades desejáveis, como: desidratação com tempos mais curtos, reidratação e retenção de compostos voláteis favorável, a cor e o sabor são melhores conservados por causa de mínimos danos térmicos, o pó é capaz de solubilizar rapidamente em água fria, e o processo é alcançado com um custo mínimo (ROCKWELL, 1963; BASTOS et al., 2005; JAKUBCZYK; GONDEK; TAMBOR, 2011).

A secagem em espuma é um processo pelo qual um líquido ou semilíquido é agitado para formar uma espuma estável e subsequentemente desidratado por

meios térmicos. As principais vantagens das técnicas de secagem em espuma, quando comparadas com outros métodos de secagem, tais como secagem por pulverização ou secagem por tambor, são temperaturas de secagem mais baixas e tempos de secagem mais curtos. Este método é relativamente fácil e pode ser realizado a menor custo do que a secagem por atomização e a liofilização (SANGAMITHRA et al., 2015). Kandasamy; Varadharaju; Kalemula (2012) mencionaram que o método de secagem em espuma é adequado para amostras que são sensíveis ao calor, pegajosas e viscosas que não podem ser secas usando a secagem por atomização. Estas vantagens podem ser atribuídas à superfície maior exposta ao ar de secagem que acelera o processo de remoção de umidade (BRYGIDYR et al., 1977).

A dificuldade relatada com este processo é manter a espuma estável durante a etapa de aquecimento. Se a espuma não permanecer estável, ocorre o rompimento da estrutura causando coalescência e graves prejuízos na operação de secagem. As variáveis que afetam a formação da espuma, a densidade e a estabilidade têm sido relatados e estas incluem a natureza química do alimento, sólidos solúveis, fração de polpa, e tipo e concentração do estabilizador de espuma ou agente espumante (HART et al., 1963).

Outro problema associado a secagem em leito de espuma é que dependendo da composição do produto a ser desidratado, este pode ficar aderido à superfície da bandeja após o processo de secagem e o seu rendimento pode ser prejudicado.

A massa específica e a estabilidade da espuma são características importantes na formação da espuma. Diante disso, há necessidade do conhecimento do tipo ideal do aditivo a ser utilizado, agentes espumantes que contribua para o aumento da estabilidade e diminuição da massa específica, afim de facilitar a saída de água durante o processo de secagem e, portanto, diminuir o tempo de secagem.

### **3.3 Cinética de secagem**

Existem inúmeros modelos de cinética de secagem disponíveis na literatura. Alguns são bastante fundamentais e levam em consideração todos os mecanismos de transferência de massa em escala microscópica (WHITAKER, 1977). Esses

modelos com maior relevância física são, no entanto, geralmente não adequados para aplicações práticas. Por outro lado, modelos mais simples muitas vezes falham em prever o comportamento de secagem com precisão por causa de uma base física limitada. Para aplicações práticas, um equilíbrio adequado entre relevância física e capacidade de gerenciamento é, portanto, essencial (COUMANS, 1987).

De acordo com Queiroz et al. (1995) e Beke et al. (1997), os modelos para a simulação do processo de secagem podem ser divididos em dois grupos: o teórico e o empírico. Os modelos empíricos geralmente são baseados na lei de Newton de resfriamento aplicada à transferência de massa (SYARIEF; MOREY; GUSTAFSON, 1984). Esses modelos consistem em formar grupos físicos adimensionais e são baseados em condições externas, como temperatura, razão de mistura e velocidade do ar de secagem (CARLESSO et al., 2007). Os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão da transferência de calor e massa e descrevem o perfil da distribuição de água dentro dos alimentos. Vários modelos de cinéticas de secagem são encontrados na literatura. Entre eles, destacam-se: Henderson e Pabis, Page, Lewis e Midilli (AKPINAR; MIDILLI; BICER, 2003; MEZIANE, 2011; KALETA et al., 2013).

O objetivo do estudo da cinética de secagem é conhecer o comportamento do material estudado ao longo do processo e a predição do tempo de secagem. A modelagem do processo é de extrema importância no desenvolvimento e otimização dos secadores, além disso, possibilita a padronização do processo, tendo como consequência, uma produção economicamente viável no final do processo de secagem (CARVALHO, 2014).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos nos laboratórios de Operações Unitárias e de Química de Alimentos do Departamento de Engenharia de Alimentos, localizados no Centro de Ciências Agrárias e Engenharias (CCAEE) na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), campus Alegre.

### 4.1 Pré-processamento

As matéria-primas foram obtidas no comércio local do município de Alegre, ES. As beterrabas foram previamente selecionadas, as que apresentaram danos e apodrecimentos foram devidamente descartadas. Em seguida, as mesmas foram lavadas e sanitizadas com solução com cloro ativo a 150 ppm por 5 minutos para reduzir a carga microbiana. Posteriormente, foram descascadas e cortadas em cubos (Figura 2).



Figura 2- Pré-processamento da beterraba crua utilizado no experimento. Fonte: Autor (2018)

Após este preparo, os pedaços de beterraba foram conduzidos para um microprocessador (centrífuga) de bancada a fim de extrair o extrato aquoso de beterraba e posteriormente usados para a formulação da espuma.

A seguir o fluxograma desde a etapa da aquisição da matéria-prima até a formação da espuma (Figura 3).

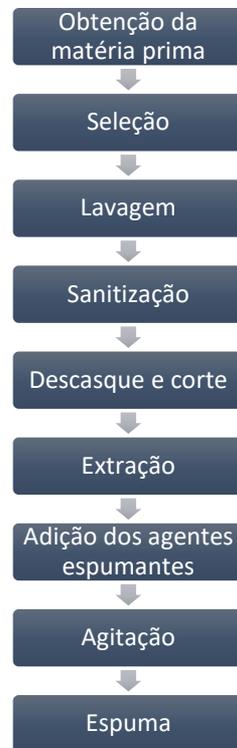


Figura 3- Fluxograma das etapas de formação da espuma de beterraba. Fonte: Autor (2018).

Após o pré-processamento, os trabalhos realizados foram divididos em duas etapas como mostrado na Figura 4.



Figura 4- Divisões das etapas experimentais. Fonte: Autor (2018)

#### 4.2 Otimização das concentrações dos agentes espumantes

Para otimizar as concentrações dos agentes a serem adicionados no extrato de beterraba para a produção da espuma e posterior secagem em secador convectivo na temperatura de 60 °C, foi realizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), com as concentrações dos dois agentes variando de 0 a 8%, sendo estes valores definidos por meio de testes preliminares. Para a formação da espuma, foram utilizados a maltodextrina, produto à base de amido de milho e Emustab®, produto à base de monoglicerídeos destilados, monoestearato de sorbitana e polisorbato.

Para duas variáveis fixas, como é o caso, esse delineamento gera 9 tratamentos (quatro pontos fatoriais, quatro pontos axiais e um ponto central). Para um DCCR com dois fatores, utiliza-se um valor de  $\alpha = 1,41$  (TEÓFILO; FERREIRA, 2006). Na Tabela 2 são mostrados os valores das concentrações dos dois agentes em cada tratamento, bem como os valores das variáveis codificadas ( $x_1$  e  $x_2$ ). Foram realizadas três repetições de cada tratamento, totalizando 27 experimentos.

Tabela 2- Delineamento Composto Central Rotacional – Valores das variáveis fixas codificadas ( $c_1$  e  $c_2$ ) e não codificadas (% m/m Maltodextrina e % m/m Emustab®)

Tratamentos	$c_1$	Maltodextrina (%)	$c_2$	Emustab® (%)
1	1	6,83	1	6,83
2	1	6,83	-1	1,17
3	-1	1,17	1	6,83
4	-1	1,17	-1	1,17
5	-1,41	0,00	0	4,00
6	1,41	8,00	0	4,00
7	0	4,00	-1,41	0,00
8	0	4,00	1,41	8,00
9	0	4,00	0	4,00

Foram ajustados modelos polinomiais, por meio de regressão linear, para as variáveis respostas: i) relacionadas à espuma: densidade e estabilidade; ii) relacionadas ao extrato em pó de beterraba obtido por leite de espuma na temperatura de 60 °C: solubilidade, umidade e tempo de molhabilidade; iii)

relacionadas ao processo de secagem: rendimento de recuperação e tempo de secagem. As condições ótimas devem ser tais que minimizem as variáveis densidade da espuma, umidade e tempo de secagem e que maximizem as variáveis estabilidade da espuma, solubilidade, tempo de molhabilidade e rendimento de recuperação.

Uma vez que as regiões ótimas para as diferentes variáveis podem ser distintas, para otimizar as quantidades de Maltodextrina e de Emustab® como agentes espumantes foi utilizada a técnica de otimização simultânea por meio da função desejabilidade (DERRINGHER; SUICH, 1980). Cada variável resposta,  $y_i$ , foi convertida em uma função desejabilidade individual,  $d_i$ , dentro do intervalo  $0 \leq d_i \leq 1$ , utilizando a Equação 1 para as variáveis que foram minimizadas e a Equação 2 para as variáveis que foram maximizadas:

$$d_i = \begin{cases} 1 & \hat{y}_i < T_i \\ \frac{(U_i - y_i)^{r_i}}{(U_i - T_i)^{r_i}} & T_i \leq \hat{y}_i \leq U_i \\ 0 & \hat{y}_i > U_i \end{cases} \quad (1)$$

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i < L_i \\ \frac{(L_i - y_i)^{r_i}}{(L_i - T_i)^{r_i}} & L_i \leq \hat{y}_i \leq T_i \\ 1 & \hat{y}_i > T_i \end{cases} \quad (2)$$

Em que:  $U_i$ - valor superior admissível,  $L_i$  - valor mínimo admissível e  $T_i$  - valor alvo (ótimo). Foi utilizada uma função desejabilidade linear ( $r_i = \forall_i$ ). Os valores  $U_i$ ,  $L_i$  e  $T_i$  foram definidos após a obtenção dos resultados experimentais.

A partir dos valores das  $N$  desejabilidades individuais, o valor da desejabilidade global,  $D$ , foi calculado através da Equação 3:

$$D = (\prod_{i=1}^N d_i)^{\frac{1}{N}} \quad (3)$$

Portanto, foi considerada como condição ótima aquela que obteve o maior valor da desejabilidade global.

O experimento foi realizado com 3 repetições e as análises em triplicata. Foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Os resultados obtidos foram analisados pela Análise de Variância (ANOVA) da regressão e da falta de

ajuste, considerando um nível de 5% de significância, foram apresentadas curvas de nível para cada resposta.

### **4.3 Otimização da temperatura de secagem**

Após a escolha da melhor concentração dos agentes (maltodextrina e Emustab®) na primeira fase, a mesma foi fixada com o objetivo de verificar a influência da temperatura do ar de secagem.

As temperaturas utilizadas foram de 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 80 °C, sendo realizadas em três repetições. Para considerar a temperatura do ar de secagem ideal desta fase, também foi utilizado a metodologia função desejabilidade (DERRINGER; SUICH, 1980), sendo as condições ótimas tais que minimizem as variáveis resposta tempo de secagem, tempo de molhabilidade, atividade de água e consumo de energia e que maximizem as variáveis solubilidade e atividade antioxidante.

As análises foram feitas em três repetições, em triplicata. Foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) ao nível de significância de 5% de significância.

### **4.4 Caracterização e produção da espuma**

A produção da espuma foi realizada por meio da mistura do extrato aquoso da beterraba com os agentes espumantes maltodextrina e Emustab®. A mistura foi realizada por intermédio de uma batedeira doméstica na velocidade mínima do equipamento por 20 minutos (Figura 5).



Figura 5- Batedeira planetária doméstica. Fonte: Autor (2018)

#### 4.4.1 Massa específica e estabilidade

A massa específica das espumas foi determinada dividindo-se a massa pelo volume por meio da adição da espuma em uma proveta de 250 mL.

De acordo com a metodologia adaptada de Baptista (2002), a determinação de estabilidade foi feita através da pesagem de 15 g de espuma, as quais foram colocadas em um funil apoiado em uma proveta, à temperatura ambiente. A massa da espuma coalescida depositada sobre a proveta foi medida após 2 horas. A estabilidade foi calculada pela Equação 4.

$$E(\%) = 100 - \left(\frac{m_c}{m_t}\right) * 100 \quad (4)$$

Onde,  $m_c$  é a massa coalescida e  $m_t$  é a massa total da espuma.

#### 4.5 Secagem em leite de espuma

As espumas obtidas através do experimento foram espalhadas em uma bandeja de aço inox com 10 mm de altura e colocadas no secador de bandejas (Figura 6) com circulação de ar na temperatura de secagem à 60 °C.

Foi registrada massa das amostras na balança analítica nos tempos: a cada 15 minutos durante a primeira hora, a cada 30 minutos durante a segunda hora e depois a cada hora até que a massa permaneça constante.

Após a secagem a massa seca é retirada da bandeja com um auxílio de uma espátula inox, triturada para obtenção do pó e armazenada.



Figura 6- Bandeja contendo a espuma de beterraba utilizada na estufa. Fonte: Autor (2018)

Com os dados obtidos, foram ajustados os modelos de Lewis, Equação 5, Henderson e Pabis (H&P), Equação 6, Page, Equação 7, e Midilli, Equação 8, para cada tratamento:

$$RU = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-kt} \quad (5)$$

$$RU = Ce^{-kt} \quad (6)$$

$$RU = e^{-kt^n} \quad (7)$$

$$RU = e^{-kt^n} + bt \quad (8)$$

Em que  $k$ ,  $C$ ,  $n$  e  $b$  são parâmetros dos modelos,  $RU$  é a razão de umidade,  $X_t$  é o teor de água, em base seca, em qualquer instante de tempo,  $X_e$  é o teor de água na condição de equilíbrio,  $X_0$  é o teor de água inicial e  $t$  é o tempo de secagem em minutos.

Os modelos das curvas de secagem foram ajustados por meio de análise de regressão não linear, usando a técnica de minimização da soma de quadrados dos desvios. Os modelos ajustados foram comparados pelo coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), definido pela Equação 9, e pelo erro padrão da regressão ( $S$ ), definido pela Equação 10.

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - \bar{RU})^2} \frac{N-1}{N-p} \quad (9)$$

$$S = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{prev,i})^2}{N-p} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Em que  $RU_{exp,i}$  e  $RU_{prev,i}$  são, respectivamente, os valores experimentais e previstos da razão de umidade para  $i$ -ésima observação, em que  $N$  é o número de observações e  $p$  o número de parâmetros no modelo.

## 4.6 Análises físico-químicas dos pós desidratados em leito de espuma

### 4.6.1 Atividade de água

A atividade de água foi determinada por meio do equipamento Hygrolab, da Rotronic (Figura 7).



Figura 7- Medidor de atividade de água. Fonte: Autor (2018).

### 4.6.2 Solubilidade

A solubilidade das amostras foi determinada através dos seguintes passos. Primeiramente foi pesado 1 g do pó, a qual foi diluída em 100 mL de água destilada em um béquer de 250 mL. Com um agitador magnético a solução foi agitada durante 5 minutos. Após a agitação, a mistura foi centrifugada a 3000 rpm durante 5 minutos a 5 °C e uma alíquota de 25 mL do sobrenadante foi seca na estufa a 105 °C até massa constante. A solubilidade foi calculada a partir das Equações 11 e 12, os resultados foram expressos em porcentagem (Adaptado de CANO-CHAUCA et al., 2005):

$$RS = \frac{(CR-CV)}{A} \quad (11)$$

$$Solubilidade (\%) = \left( RS * \frac{100}{25} \right) * 100 \quad (12)$$

Em que, RS é massa de resíduo solúvel (g), CR é a massa do cadinho com resíduo após sair da estufa (g), CV é massa do cadinho vazio (g) e A é massa da amostra.

#### **4.6.3 Tempo de molhabilidade**

O teste foi efetuado colocando-se 1,0 g de amostra, sem agitação, em 200 mL de água destilada na temperatura ambiente, utilizando-se um becker de 250 mL. Foi medido o tempo (s) necessário para que todas as partículas fiquem submersas (Adaptado de LANNES; MEDEIROS, 2003).

#### **4.6.4 Análise do teor de água**

A análise de teor de água foi determinada pelo método gravimétrico por secagem em estufa na temperatura de 105°C até massa constante (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

#### **4.6.5 Rendimento de recuperação**

O rendimento de recuperação foi determinado através da razão entre a massa do pó coletado após ser retirado da bandeja e a massa seca presente na bandeja ao final da secagem.

#### 4.6.6 Atividade antioxidante (ABTS)

A atividade antioxidante foi determinada pelo método de ensaio do radical ABTS (2,2'-azino-bis (3-etilbenzotiazolin) 6-ácido sulfônico) descrito por RÉ (1998). Para a formação do radical ABTS, foi adicionada a solução aquosa de ABTS 7 mM à solução de persulfato de potássio 2,45 mM, a qual foi mantida na ausência de luz à temperatura ambiente por 16 horas. Em seguida, 3,5 mL da solução radical ABTS foram adicionados uma alíquota de 0,5 mL do extrato. A atividade antioxidante foi determinada utilizando uma curva padrão de Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromo-2-ácido-carboxílico, Sigma-Aldrich®), analisados no Espectrofotômetro modelo Nova 1800 UV no comprimento de onda de 734 nm (Figura 8) e os resultados foram expressos em equivalente de Trolox.



Figura 8- Espectrofotômetro modelo nova 1800 UV. Fonte: Autor (2018).

#### 4.6.7 Análise de cor

As análises de cor foram realizadas com auxílio do colorímetro da marca Konica Minolta CM-5 (Figura 9), utilizando as coordenadas de cor do sistema CIELab, L\*, a\*, b\*, em que L\* indica a luminosidade (expressa o grau de claridade da

cor), que varia do preto ( $L^* = 0$ ) ao branco ( $L^* = 100$ ),  $a^*$  consiste no eixo que varia do vermelho ao verde,  $b^*$  varia do amarelo ao azul (HUNTERLAB, 1996).



Figura 9- Colorímetro Komica Minolta. Fonte: Autor (2018)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Otimização das concentrações dos agentes espumantes

#### 5.1.1 Massa específica e estabilidade das espumas

As concentrações de maltodextrina e Emustab® utilizadas nas formulações influenciaram significativamente ( $p < 0,05$ ) na massa específica e na estabilidade das espumas do extrato de beterraba. A Tabela 3 apresenta os modelos de regressão ajustados para essas variáveis.

Tabela 3- Modelos ajustados e coeficientes de determinação para as respostas massa específica e estabilidade.

Variável	Modelo ajustado	$r^2$
Massa específica	$\hat{Y} = 0,11 - 0,02 x_1 - 0,22 x_2 - 0,02 x_1^2 + 0,21 x_2^2 + 0,04 x_1 x_2$	0,8316
Estabilidade	$\hat{Y} = 40 + 13,32 x_1 + 36,43 x_2 + 19,38 x_1^2 + 4,38 x_2^2 - 12,5 x_1 x_2$	0,9981

As Tabelas 4 e 5 mostram a análise de variância da regressão e da falta de ajuste dos modelos para as variáveis massa específica e estabilidade, respectivamente. Uma vez que os modelos ajustados tiveram regressão significativa ( $p < 0,05$ ) e falta de ajuste não significativa ( $p > 0,05$ ), eles são considerados adequados. Além disso, eles apresentaram elevados valores de coeficiente de determinação.

Tabela 4- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para a massa específica.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	1,8887	0,3777	20,7334*	0,0000
Resíduo	21	0,3826	0,0182		
Falta de ajuste	3	0,1286	0,0429	3,0390 <sup>ns</sup>	0,0558
Erro puro	18	0,2540	0,0141		
Total	26	2,2713			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ ).

Tabela 5- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para a estabilidade

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	42185,3898	8437,0780	2179,9398*	0,0000
Resíduo	21	81,2768	3,8703		
Falta de ajuste	3	26,9222	8,9741	2,9718 <sup>ns</sup>	0,0593
Erro puro	18	54,3546	3,0197		
Total	26	42266,6667			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ ).

A Figura 10 mostra as curvas de nível para a variável resposta massa específica dentro do intervalo estudado. Nota-se que a concentração de Emustab® ( $x_2$ ) teve uma influência muito maior sobre a massa específica do que a concentração de maltodextrina ( $x_1$ ). Dentro da região estudada, o valor mínimo para a massa específica previsto pelo modelo foi de 0,01696, que ocorreu em  $x_1$  igual a 0,3960 e  $x_2$  igual a 1,3576, os quais correspondem a 5,12% de maltodextrina e 7,84% de Emustab®, respectivamente.

Segundo Carvalho (2014), o agente espumante Maltodextrina teve maior valor de massa específica da espuma em todas as concentrações (2,5%, 5,0%, 7,5% e 10%), em relação aos demais aditivos (Albumina, Emustab® e Super Liga Neutra®) estudados. Já o Emustab® obteve menor valor de massa específica da espuma nas diferentes combinações de concentrações, comparado aos demais aditivos em seu trabalho com a secagem de polpa de abóbora em leite de espuma.

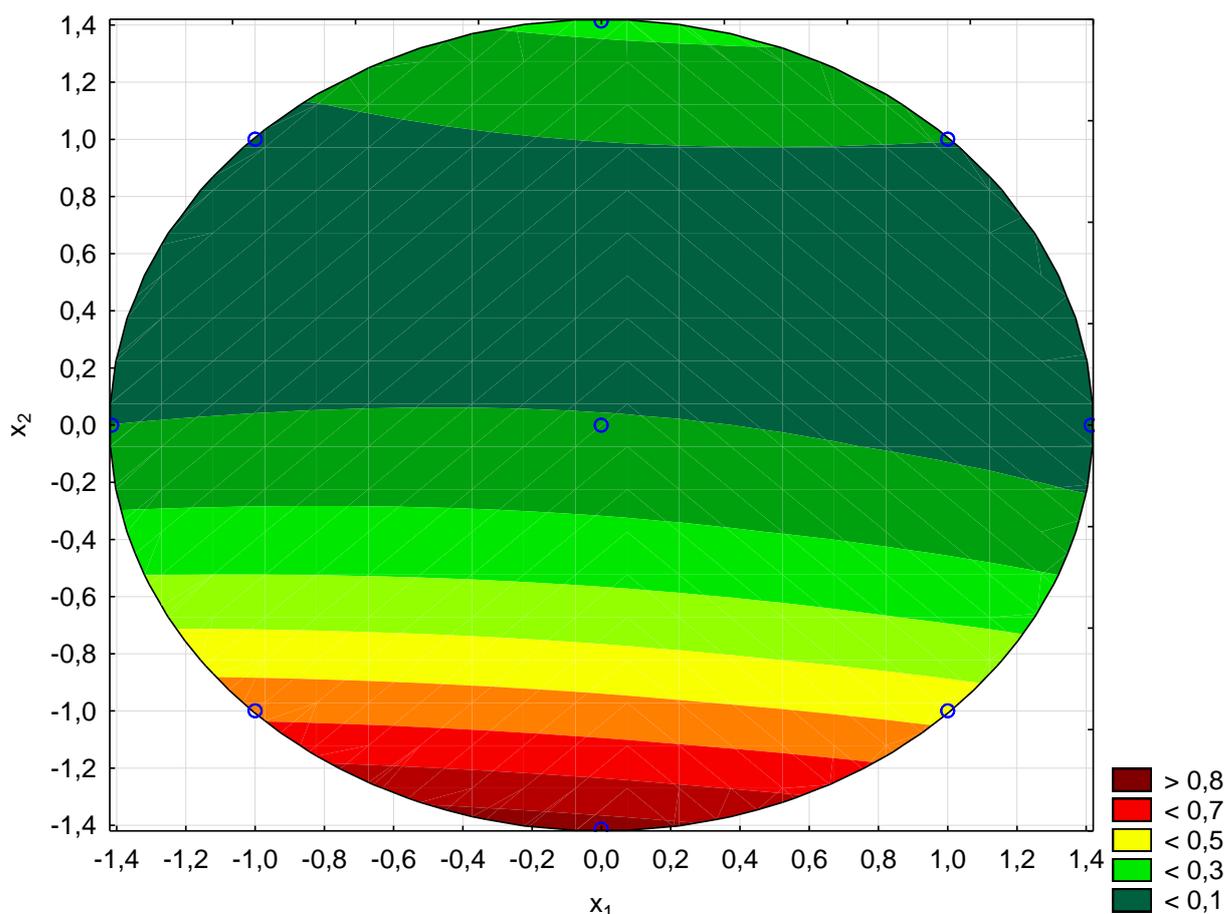


Figura 10- Curvas de nível da resposta massa específica da espuma, em diferentes concentrações de maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

A Figura 11 mostra as curvas de nível para a variável resposta estabilidade dentro do intervalo estudado. Nota-se que os maiores valores de estabilidade ocorreram nas maiores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ). Dentro da região estudada, o valor máximo para a estabilidade previsto pelo modelo foi de 100%, que ocorreu em  $x_1$  igual a 0,4808 e  $x_2$  igual a 1,3294, os quais correspondem a de 5,36% maltodextrina e 7,76% de Emustab®, respectivamente.

Freitas (2016), estudou o processo de secagem em leito de espuma da manga Ubá e observou a estabilidade da espuma com a adição de alguns agentes espumantes como albumina, Emustab®, Superliga neutra® e Maltodextrina, nas concentrações de 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0% e 2,5% para a formação da espuma, encontrando altos valores de estabilidade da espuma, sendo que o Emustab® obteve melhores resultados de estabilidade do que a maltodextrina.

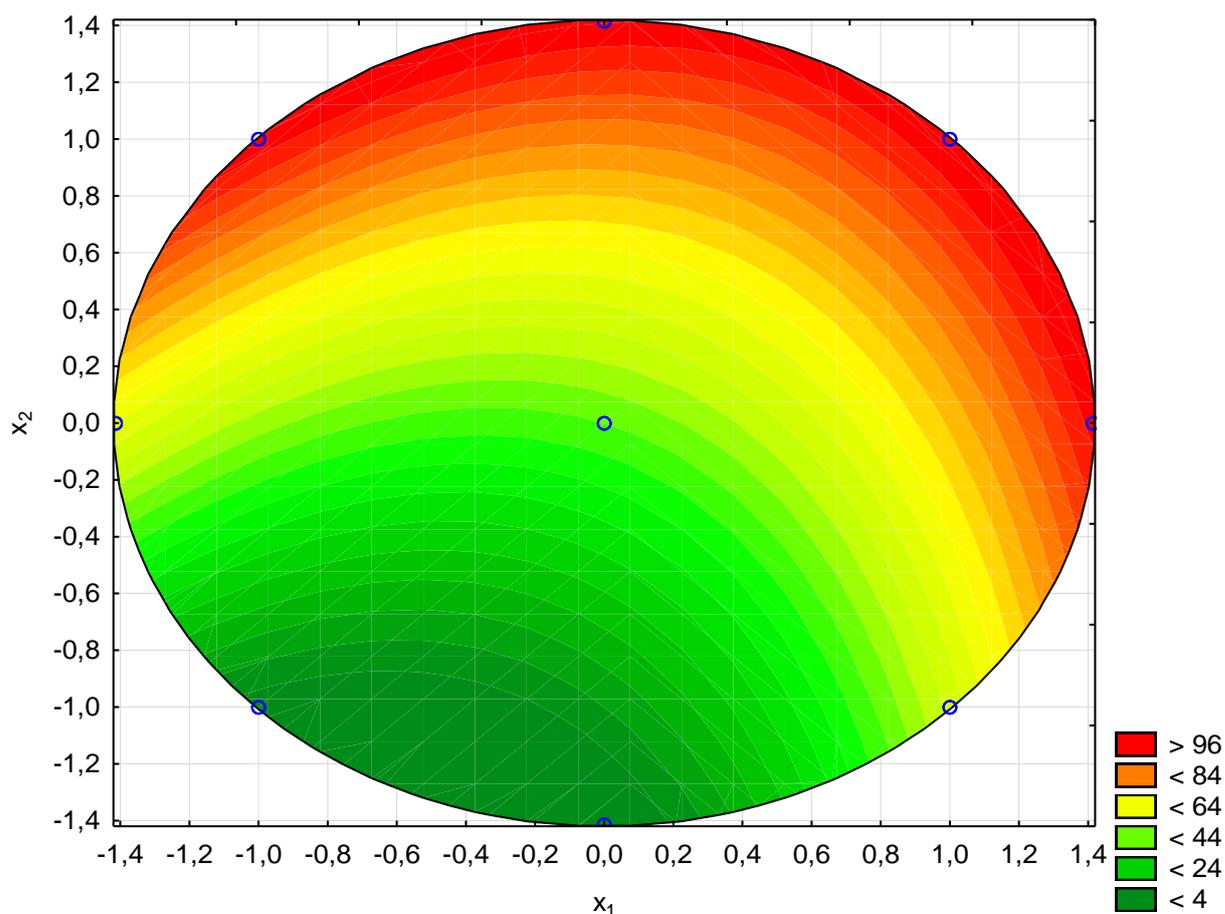


Figura 11- Curvas de nível para as respostas estabilidade da espuma, em diferentes concentrações de maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

### 5.1.2 Curvas de secagem dos extratos de beterraba em leito de espuma a 60°C

Na Figura 12 são apresentadas as curvas de secagem para as diferentes concentrações de agentes espumantes (DCCR) na temperatura de 60 °C, bem como as curvas simuladas pelos modelos ajustados. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados, o coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão da regressão para cada modelo, em cada tratamento testado.

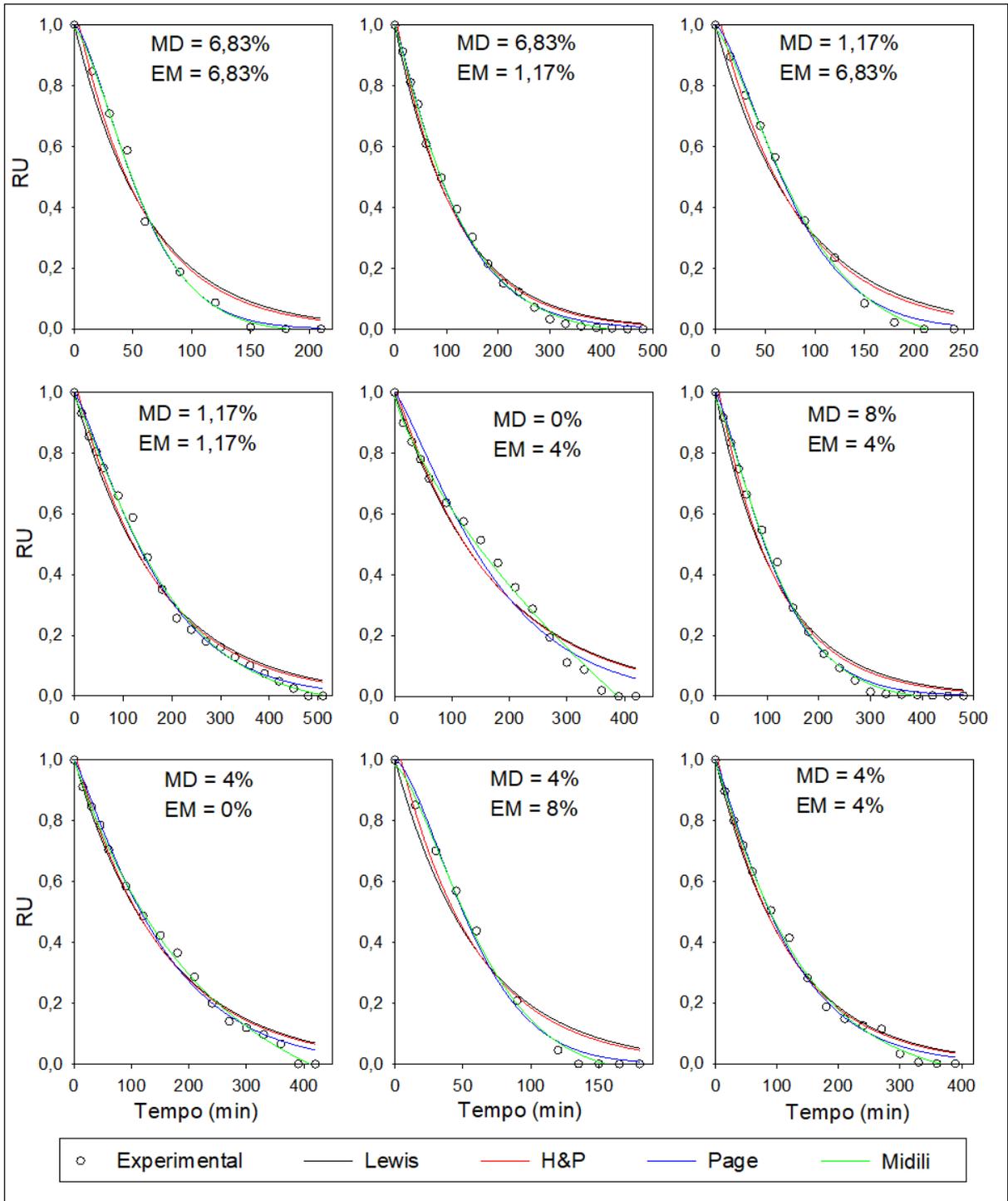


Figura 12- Curvas de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba na temperatura de 60 °C em diferentes concentrações de agentes espumantes. MD: Concentração de maltodextrina; EM: Concentração de Emustab®.

Tabela 6- Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos ajustados em diferentes concentrações de agentes espumantes.

Tratamentos	Modelo	k	a	n	b	$R_{aj}^2$	Erro Padrão
1	Lewis	0,0161	-	-	-	0,9689	0,0673
	H&P	0,0173	1,0697	-	-	0,9716	0,0642
	Page	0,0024	-	1,4553	-	0,9950	0,0269
	Midili	0,0023	0,9874	1,4639	0,00005	0,9958	0,0243
2	Lewis	0,0084	-	-	-	0,9920	0,0310
	H&P	0,0088	1,0424	-	-	0,9936	0,0277
	Page	0,0037	-	1,1681	-	0,9977	0,0168
	Midili	0,0042	0,9970	1,1306	0,00005	0,9983	0,0143
3	Lewis	0,0118	-	-	-	0,9670	0,0686
	H&P	0,0128	1,0756	-	-	0,9718	0,0635
	Page	0,0018	-	1,4196	-	0,9954	0,0257
	Midili	0,0021	0,9872	1,3661	-0,0002	0,9969	0,0211
4	Lewis	0,0058	-	-	-	0,9852	0,0419
	H&P	0,0061	1,0467	-	-	0,9874	0,0386
	Page	0,0018	-	1,2268	-	0,9954	0,0233
	Midili	0,0018	0,9821	1,2089	0,00005	0,9962	0,0213
5	Lewis	0,0057	-	-	-	0,9633	0,0647
	H&P	0,0058	1,0222	-	-	0,9617	0,0661
	Page	0,0017	-	1,2324	-	0,9729	0,0556
	Midili	0,0083	0,9894	0,8002	-0,0010	0,9933	0,0277
6	Lewis	0,0082	-	-	-	0,9823	0,0478
	H&P	0,0087	1,0632	-	-	0,9857	0,0429
	Page	0,0019	-	1,2998	-	0,9966	0,0209
	Midili	0,0016	0,9768	1,3219	0,00004	0,9974	0,0183
7	Lewis	0,0064	-	-	-	0,9872	0,0383
	H&P	0,0066	1,0298	-	-	0,9878	0,0374
	Page	0,0028	-	1,1579	-	0,9928	0,0286
	Midili	0,0055	0,9984	0,9897	-0,0003	0,9977	0,0161
8	Lewis	0,0164	-	-	-	0,9582	0,0780
	H&P	0,0177	1,0810	-	-	0,9617	0,0747
	Page	0,0018	-	1,5195	-	0,9937	0,0303
	Midili	0,0020	0,9798	1,4719	-0,0002	0,9953	0,0261
9	Lewis	0,0084	-	-	-	0,9903	0,0341
	H&P	0,0087	1,0326	-	-	0,9911	0,0327
	Page	0,0040	-	1,1518	-	0,9953	0,0237
	Midili	0,0053	0,9948	1,0772	-0,0001	0,9968	0,0196

Pode-se observar na Tabela 6 que o modelo de Midili foi o que melhor representou as cinéticas de secagem do extrato de beterraba em leito de espuma, com maiores valores de coeficiente de determinação ajustado e menores valores de erro padrão da regressão em todas as concentrações de agentes estudadas. Esse resultado também é observado na Figura 10, em que a curva ajustada pelo modelo

de Midili foi a que mais se aproximou dos dados experimentais em todos os tratamentos. Pereira (2008) verificou que o modelo de Midili foi o mais representativo, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,99, para a secagem em leite de espuma do extrato aquoso de própolis. Moraes et al. (2013) avaliaram a cinética de secagem dos grãos de feijão-caupi, ajustando 12 modelos matemáticos e verificaram que o modelo de Midili apresentou o melhor ajuste, para as temperaturas de secagem de 45 e 55 °C, com coeficientes de determinação de 1,0 e 0,9999, respectivamente. Maciel (2017) estudou a cinética de secagem em leite de espuma de extrato de café e encontrou que o modelo de Midili foi o de melhor desempenho, com coeficientes de determinação ajustados acima de 0,99.

Para avaliar o efeito das concentrações dos agentes espumantes sobre o tempo de secagem, estimou-se, para cada tratamento testado, o tempo de secagem considerando-o como o tempo no qual a razão de umidade atingiu o valor de equilíbrio, ou seja, razão de umidade igual a zero. Como o modelo escolhido foi o de Midili, tem-se uma equação não linear (Equação 13).

$$a e^{-k t_s^n} + b t_s = 0 \quad (13)$$

Para calcular a solução dessa equação utilizou-se o método de Newton com tolerância de  $10^{-6}$ . O número máximo de interações necessárias para a convergência foram 11. A partir dos resultados ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 14.

$$\hat{Y} = 312,86 - 14,86 x_1 + 27,27 x_1^2 - 71,65 x_2 - 46,40 x_2^2 + 7,47 x_1 x_2 \quad (14)$$

Em que  $\hat{Y}$  é o tempo de secagem, em minutos,  $x_1$  é o valor codificado da concentração de maltodextrina e  $x_2$  é o valor codificado da concentração de Emustab®.

A Tabela 7 apresenta a análise de variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo ajustado, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,6288. Nota-se que o modelo apresentou regressão significativa e falta de ajuste não significativa, o que o torna adequado para estimar o tempo de secagem em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab®.

Tabela 7- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do tempo de secagem das espumas.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	195298,8561	39059,7712	9,8081*	0,0001
Resíduo	21	83630,2229	3982,3916		
Falta de ajuste	3	18927,1769	6309,0590	1,7551 <sup>ns</sup>	0,1917
Erro puro	18	64703,0460	3594,6137		
Total	26	278929,0790			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ )

A Figura 13 apresenta as curvas de nível para o tempo de secagem em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab® dentro da região do delineamento DCCR.

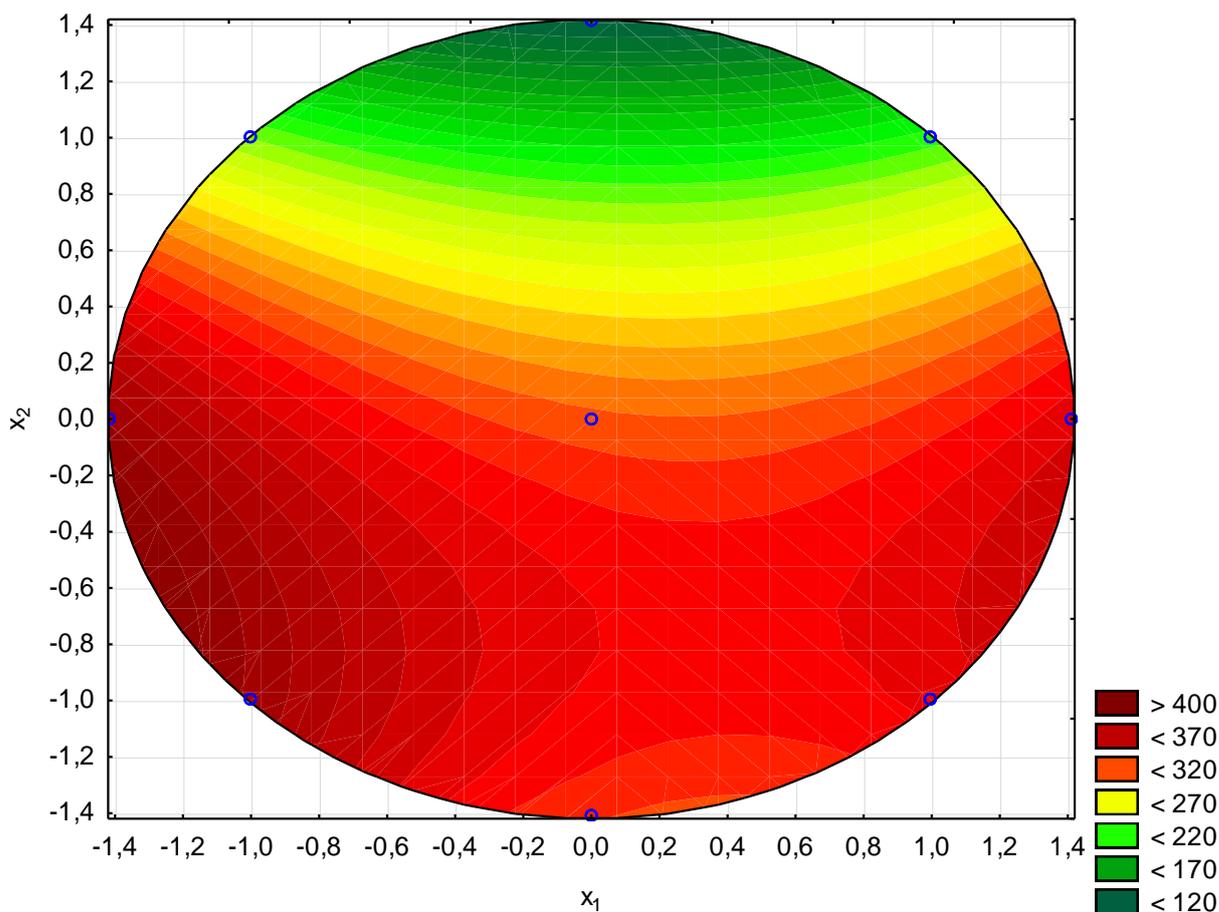


Figura 13- Curvas de nível da variável resposta tempo de secagem em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

Ao analisar a Figura 13 estimada pelo modelo, verifica-se que os maiores tempos de secagem são previstos nas menores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ), semicírculo abaixo do ponto central, enquanto que os menores tempos são previstos nas maiores concentrações de Emustab®, semicírculo acima do ponto central. Dentro da região estudada, o valor mínimo previsto para o tempo de secagem foi de 118,72 min, que ocorreu em  $x_1$  igual a 0 e  $x_2$  igual a 1,4142, os quais correspondem a 4% de maltodextrina e 8% de Emustab®, respectivamente. Segundo Rajkumar et al. (2007) a formação de espaço poroso na espuma aumenta a área superficial, o que facilita o processo de difusão de umidade durante a secagem. Assim, os resultados indicam que o Emustab® contribuiu mais para esse processo, pois foi possível observar que maiores valores de  $x_2$  contribuíram para reduzir o tempo de secagem. Esse fato é importante para o estudo da secagem, visto que, quanto menor o tempo que o produto fica exposto à temperatura de secagem, mais preservadas são as características sensoriais, nutricionais e funcionais do alimento (SOUZA, 2011).

### 5.1.3 Solubilidade

O modelo matemático ajustado para a solubilidade está apresentado na Equação 15.

$$\hat{Y} = 73,53 + 1,34 x_1 - 3,89 x_2 - 0,99 x_1^2 + 1,66 x_2^2 + 2,90 x_1 x_2 \quad (15)$$

Em que  $\hat{Y}$  é a solubilidade do extrato de beterraba seco em leite de espuma, em %,  $x_1$  é o valor codificado da concentração de maltodextrina e  $x_2$  é o valor codificado da concentração de Emustab®.

A Tabela 8 apresenta a análise de variância da regressão e da falta de ajuste do modelo ajustado, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,7723. Nota-se que o modelo apresentou regressão significativa e falta de ajuste não significativa, o que o torna adequado para estimar a solubilidade em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab®.

Tabela 8- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo da solubilidade do extrato de beterraba desidratado

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	592,4483	118,4897	14,2464*	0,0000
Resíduo	21	174,6607	8,3172		
Falta de ajuste	3	58,3307	19,4436	3,0085 <sup>ns</sup>	0,0574
Erro puro	18	116,3300	6,4628		
Total	26	767,1090			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); ns: Não significativo ( $p > 0,05$ )

A Figura 14 apresenta as curvas de nível para a solubilidade em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab® dentro da região de estudo.

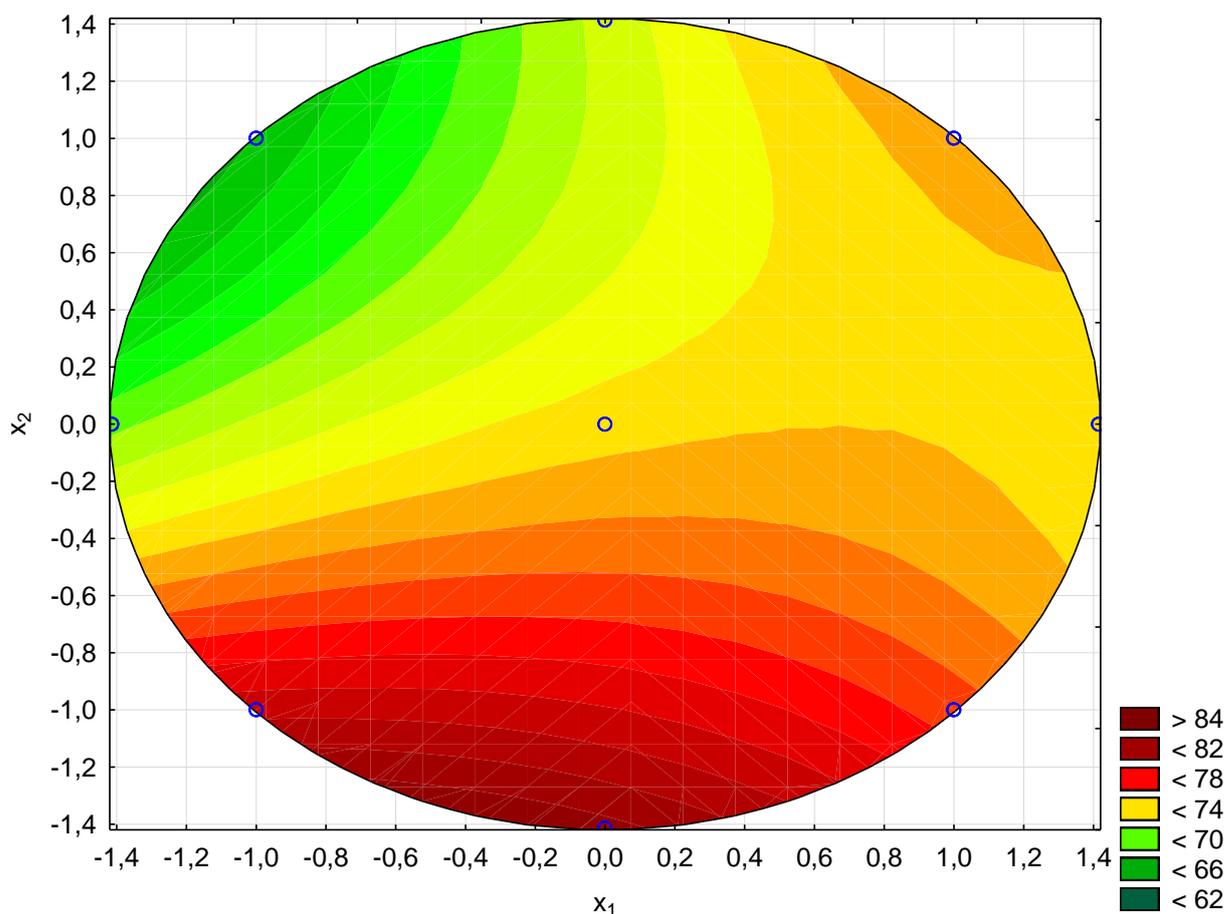


Figura 14- Curvas de nível da variável resposta solubilidade em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

Nota-se que os maiores valores de solubilidade são previstos nas menores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ). Dentro da região estudada, o valor máximo

previsto para a solubilidade foi de 82,74%, que ocorreu em  $x_1$  igual a -0,396 e  $x_2$  igual a -1,3577, os quais correspondem a 2,88% de maltodextrina e 0,16% de Emustab®, respectivamente.

Dentro da região estudada, a solubilidade prevista pelo modelo variou de 65,86% a 82,74%. A solubilidade do extrato de beterraba encontrada no presente estudo foi maior que a do suco em pó de manga (51,83 a 66,65%) obtida por Wilson et al. (2014) e que o pó de camarão (18,06 a 19,58%) obtido por Azizpour et al. (2016), ambos obtidos pelo método de secagem em leito de espuma. Contudo, outros trabalhos obtiveram valores maiores de solubilidade, como o obtido por Dantas (2010), o qual obteve solubilidade de 98% em pós de abacaxi e 91% em pós de manga desidratados em leito de espuma com adição de 1% de liga neutra e 1% de emulsificante na temperatura de 70 °C e por Cruz (2013), que obteve solubilidade de 88,8 a 89% em pós de goiaba ao variar a concentração de agente emulsificante na temperatura de 60 °C.

#### 5.1.4 Tempo de molhabilidade

O modelo matemático ajustado para a tempo de molhabilidade foi apresentado na Equação 16.

$$\hat{Y} = 158,92 + 41,21 x_1 + 61,38 x_1^2 + 124,10 x_2 - 31,00 x_2^2 + 4,08 x_1 x_2 \quad (16)$$

Em que  $\hat{Y}$  é a tempo de molhabilidade do extrato de beterraba seco em leito de espuma, em segundos,  $x_1$  é o valor codificado da concentração de maltodextrina e  $x_2$  é o valor codificado da concentração de Emustab®.

A Tabela 9 apresenta a análise de variância da regressão e da falta de ajuste do modelo ajustado, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,7904. Nota-se que o modelo apresentou regressão significativa e falta de ajuste não significativa, o que o torna adequado para estimar a tempo de molhabilidade em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab®.

Tabela 9- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do tempo de molhabilidade do extrato de beterraba desidratado.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
------	------	------	------	---	---

Regressão	5	515427,3220	103085,4644	15,8335*	0,0000
Resíduo	21	136722,8465	6510,6117		
Falta de ajuste	3	40209,2053	13403,0684	2,4997 <sup>ns</sup>	0,0923
Erro puro	18	96513,6412	5361,8690		
Total	26	652150,1686			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ )

A Figura 15 apresenta as curvas de nível para o tempo de molhabilidade em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab® dentro da região de estudo.

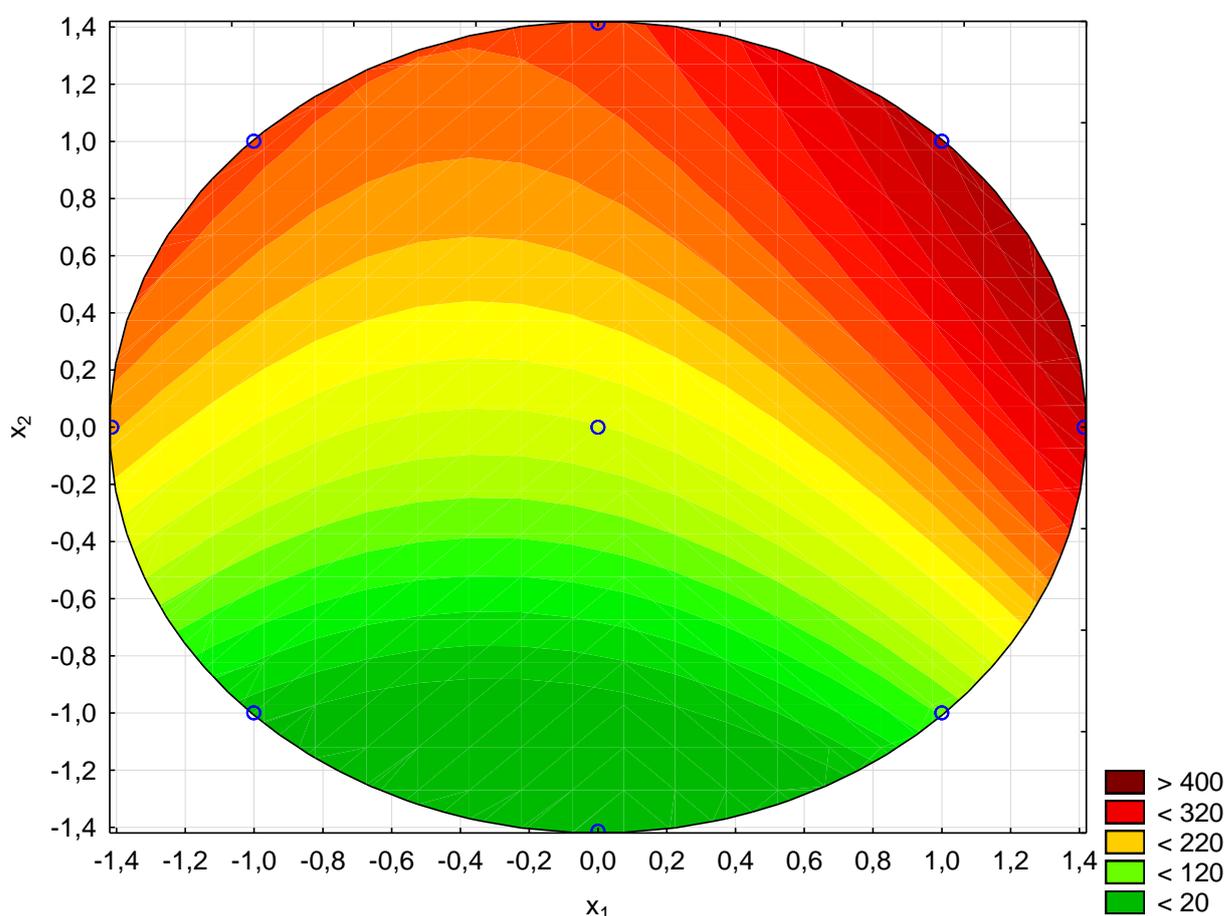


Figura 15- Curvas de nível da variável resposta tempo de molhabilidade em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

Nota-se que os menores valores de tempo de molhabilidade são previstos nas menores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ). Dentro da região estudada, o valor mínimo previsto para a tempo de molhabilidade é de 12 s, que ocorreu em  $x_1$  igual a

0 e  $x_2$  igual a -1,4142, os quais correspondem a 4% de maltodextrina e 0% de Emustab®, respectivamente.

O tempo de molhabilidade pode ser caracterizado pela susceptibilidade das partículas em serem penetradas pela água, podendo influenciar em uma série de etapas tais como aglomeração, granulação, revestimento, secagem, bem como na dissolução e solubilidade dos pós (FORNY; MARABI; PALZER, 2011). Segundo esses autores, ao dispersar os pós com um mínimo de agitação em água quente e fria e não ocorrer a formação de grumos, os pós podem ser denominados como instantâneos.

Dentro da região estudada, a tempo de molhabilidade prevista pelo modelo variou de 12 s a 377,29 s. Fernandes; Borges; Botrel (2014) encontraram valores de tempo de Molhabilidade que variaram de 155 a 481 segundos para o pó de óleo essencial de alecrim microencapsulado com goma arábica. Tonon (2009) encontrou um tempo de molhamento de 8,61 minutos do pó de suco de açaí com maltodextrina obtido por spray dryer. Fernandes; Borges; Botrel (2014), ao estudarem o tipo de material para encapsular óleo essencial de alecrim também em spray dryer, verificaram elevados tempos de molhamento (acima de 4 minutos) dos pós quando usada a maltodextrina na formulação. Os maiores tempos de molhamento obtidos por esses autores, podem ser decorrentes da composição do alimento, bem como do método de secagem da concentração e do tipo de agente emulsificante utilizados.

### 5.1.5 Rendimento de recuperação

O modelo matemático ajustado para o rendimento de recuperação dos pós está apresentado na Equação 17.

$$\hat{Y} = 83,87 - 0,37 x_1 + 2,04 x_1^2 + 17,04 x_2 - 13,05 x_2^2 + 2,31 x_1 x_2 \quad (17)$$

Em que  $\hat{Y}$  é o rendimento de recuperação dos pós obtidos após o processo de secagem do extrato de beterraba em leite de espuma, %,  $x_1$  é o valor codificado da concentração de maltodextrina e  $x_2$  é o valor codificado da concentração de Emustab®.

A Tabela 10 apresenta a análise de variância da regressão e da falta de ajuste do modelo ajustado, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,9303. Nota-se que o modelo apresentou regressão significativa e falta de ajuste não significativa, o que o torna adequado para estimar o rendimento de recuperação em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab®.

Tabela 10- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do rendimento de recuperação de secagem do extrato de beterraba.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	10094,6119	2018,9224	56,0960*	0,0000
Resíduo	21	755,8002	35,9905		
Falta de ajuste	3	218,6602	72,8867	2,4425 <sup>ns</sup>	0,0975
Erro puro	18	537,1400	29,8411		
Total	26	10850,4121			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); <sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ )

A Figura 16 apresenta as curvas de nível para o rendimento de recuperação em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab® dentro da região de estudo.

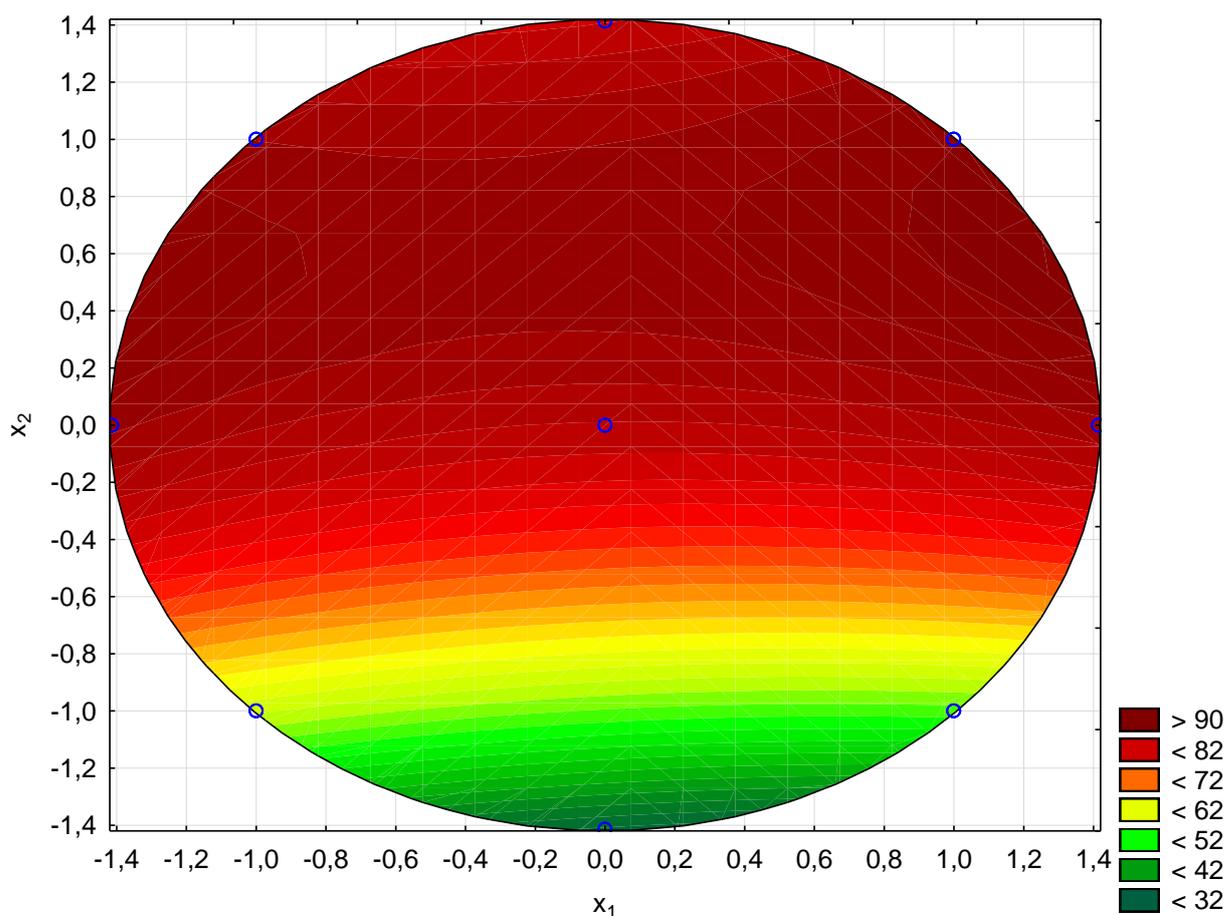


Figura 16- Curvas de nível da variável resposta rendimento de recuperação em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

Nota-se que os menores valores de rendimento de recuperação são previstos nas menores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ). Dentro da região estudada, o valor máximo previsto para o rendimento de recuperação foi de 94%, que ocorreu em  $x_1$  igual a 1,2445 e  $x_2$  igual a -0,6505, os quais correspondem a 7,52% de maltodextrina e 5,84% de Emustab®, respectivamente.

### 5.1.6 Teor de água

O modelo matemático ajustado para a teor de água é apresentado na Equação 18.

$$\hat{Y} = 10,47 + 0,28 x_1 - 0,60 x_2 - 0,36 x_1^2 + 0,51 x_2^2 + 1,418 x_1 x_2 \quad (18)$$

Em que  $\hat{Y}$  é o teor de umidade do extrato de beterraba seco em leito de espuma, em %,  $x_1$  é o valor codificado da concentração de maltodextrina e  $x_2$  é o valor codificado da concentração de Emustab®.

A Tabela 11 apresenta a análise de variância da regressão e da falta de ajuste do modelo ajustado, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,8556. Nota-se que o modelo apresentou regressão significativa e falta de ajuste não significativa, o que o torna adequado para estimar o teor de umidade em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab®.

Tabela 11- Análise de Variância da regressão e da falta de ajuste para o modelo do teor de água do extrato de beterraba desidratado.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Regressão	5	43,5263	8,7053	24,8884*	0,0000
Resíduo	21	7,3452	0,3498		
Falta de ajuste	3	2,4198	0,8066	2,9477 <sup>ns</sup>	0,0607
Erro puro	18	4,9254	0,2736		
Total	26	50,8714			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ ); ns: Não significativo ( $p > 0,05$ )

A Figura 17 apresenta as curvas de nível para o teor de água em função das concentrações codificadas de maltodextrina e Emustab® dentro da região de estudo.

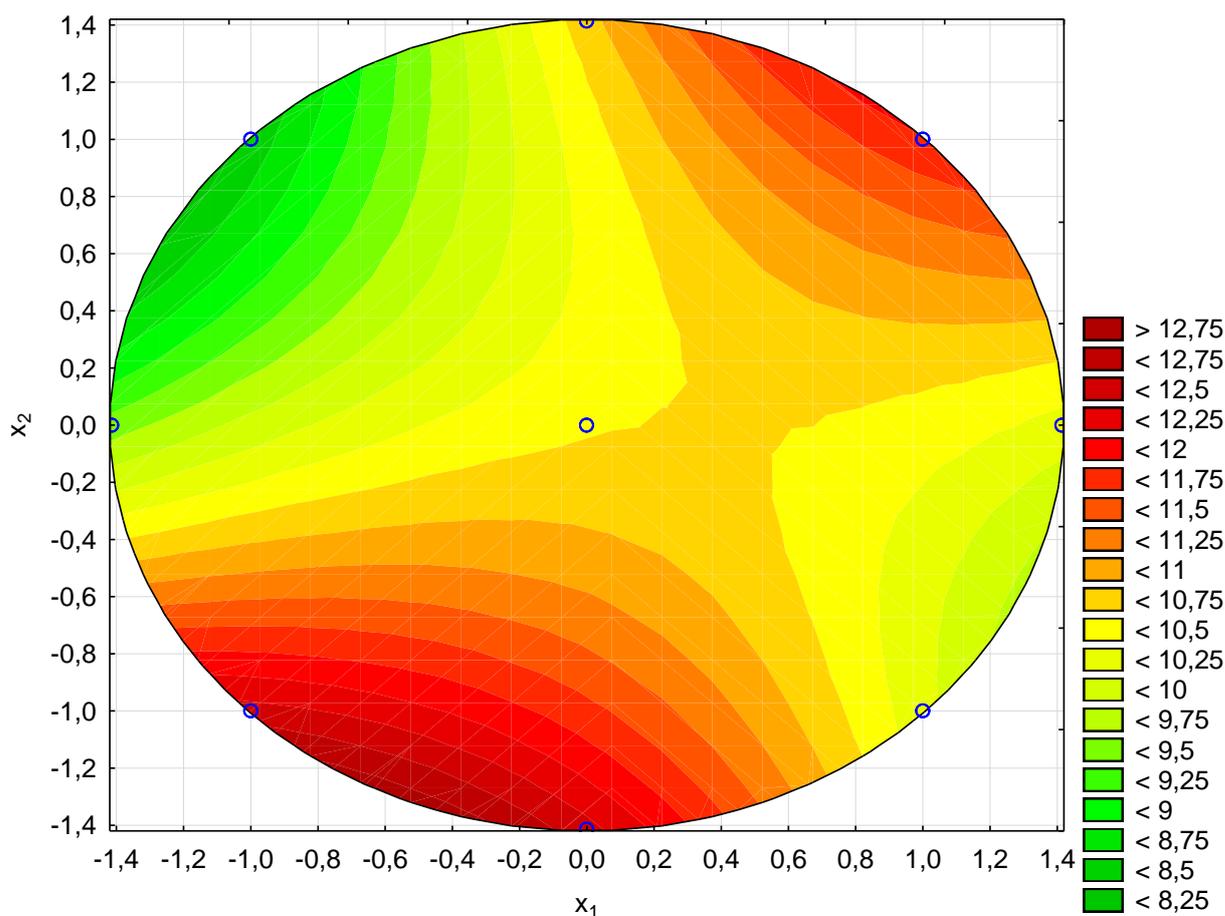


Figura 17- Curvas de nível da variável resposta teor de água em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

Nota-se que os menores valores do teor de água são previstos nas menores concentrações de maltodextrina combinadas com maiores concentrações de Emustab® ( $x_2$ ). Dentro da região estudada, o valor mínimo previsto para o teor de água é de 8,19%, que ocorreu em  $x_1$  igual a -1,1879 e  $x_2$  igual a 0,7637, os quais correspondem a 0,64% de maltodextrina e 6,16% de Emustab®, respectivamente.

Dentro da região estudada, o teor de água previsto pelo modelo variou de 8,19% a 12,85%.

Jaya e Das (2004) avaliaram polpa de manga em pó e encontraram nas condições estudadas o teor de água de 4,16 a 4,68%, inferiores aos teores obtidos neste trabalho.

### 5.1.7 Otimização das concentrações dos agentes espumantes pela função desejabilidade

Para os cálculos da desejabilidade individual das variáveis resposta que se desejam minimizar, o valor alvo (T) considerado foi o valor mínimo estimado para essas variáveis resposta pelos modelos ajustados dentro do intervalo estudado e o limite superior admissível (U) foi o valor máximo estimado dentro do mesmo intervalo. Para as variáveis resposta que se desejam maximizar, o valor alvo (T) considerado foi o valor máximo estimado para essas variáveis resposta pelos modelos ajustados dentro desse intervalo e o limite inferior admissível (L) foi o valor mínimo. Apenas para a variável estabilidade optou-se por valores mais rigorosos, uma vez que um alto nível de coalescência, ou seja, uma baixa estabilidade, compromete o processo de secagem em leito de espuma. Para essa variável, o valor mínimo previsto pelo modelo, dentro da região de estudo, foi de 0%, contudo, considerou-se o limite inferior admissível de 95%. Os valores estabelecidos para as variáveis utilizadas estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Valores limite das variáveis resposta utilizadas na função desejabilidade

Variáveis resposta	L	T	U
Massa específica da espuma	-	0,01696	0,8379
Estabilidade da espuma	95	100	-
Tempo de secagem	-	118,72	409,32
Solubilidade do extrato seco	65,86	82,74	-
Tempo de molhabilidade do extrato seco	-	12	377,29
Rendimento de recuperação	33,67	94,00	-
Teor de água do extrato seco	-	8,19	12,85

Após realizar os cálculos da desejabilidade, obteve-se um gráfico de curvas de nível (Figura 18), que apresenta o perfil da desejabilidade global, definida de acordo com os valores limites escolhidos. A desejabilidade máxima foi igual a 0,6526, a qual ocorreu em  $x_1$  igual a -0,5657 e  $x_2$  igual a 1,2162, que correspondem, respectivamente, a 2,4% de maltodextrina e 7,44% de Emustab®. Estes níveis de fatores representam o conjunto de respostas mais satisfatório, estabelecendo um ponto ótimo do processamento, dentro da região estudada.

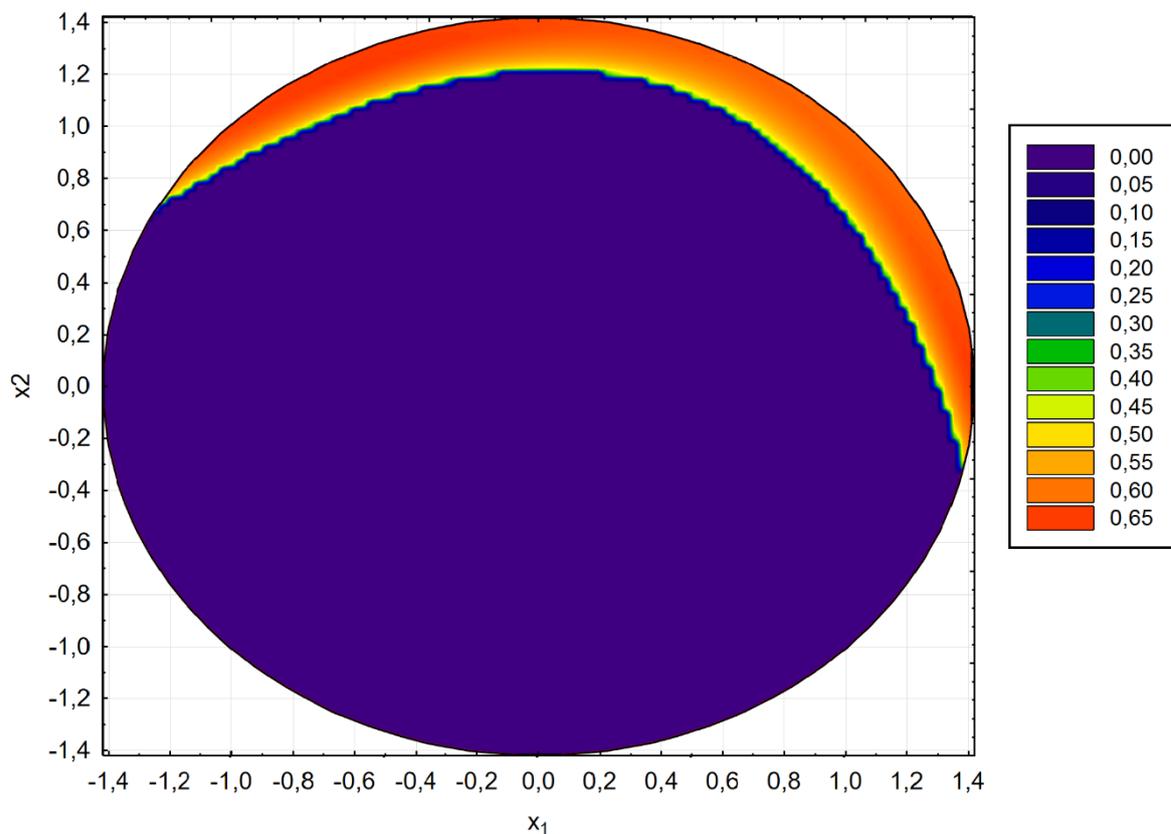


Figura 18- Curvas de nível da desejabilidade global em função dos valores codificados das concentrações dos agentes maltodextrina ( $x_1$ ) e Emustab® ( $x_2$ ).

## 5.2 Otimização da temperatura do ar de secagem

Para o preparo das espumas nessa etapa do trabalho utilizou-se 2,4% de maltodextrina e 7,44% de Emustab®, que correspondem à condição ótima encontrada na etapa anterior.

### 5.2.1 Curvas de secagem dos extratos de beterraba em diferentes temperaturas

Na Figura 19 são apresentadas as curvas de secagem para as diferentes temperaturas testadas, bem como as curvas simuladas pelos modelos ajustados. Na Tabela 13 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados, o coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão da regressão para cada modelo, em cada tratamento testado.

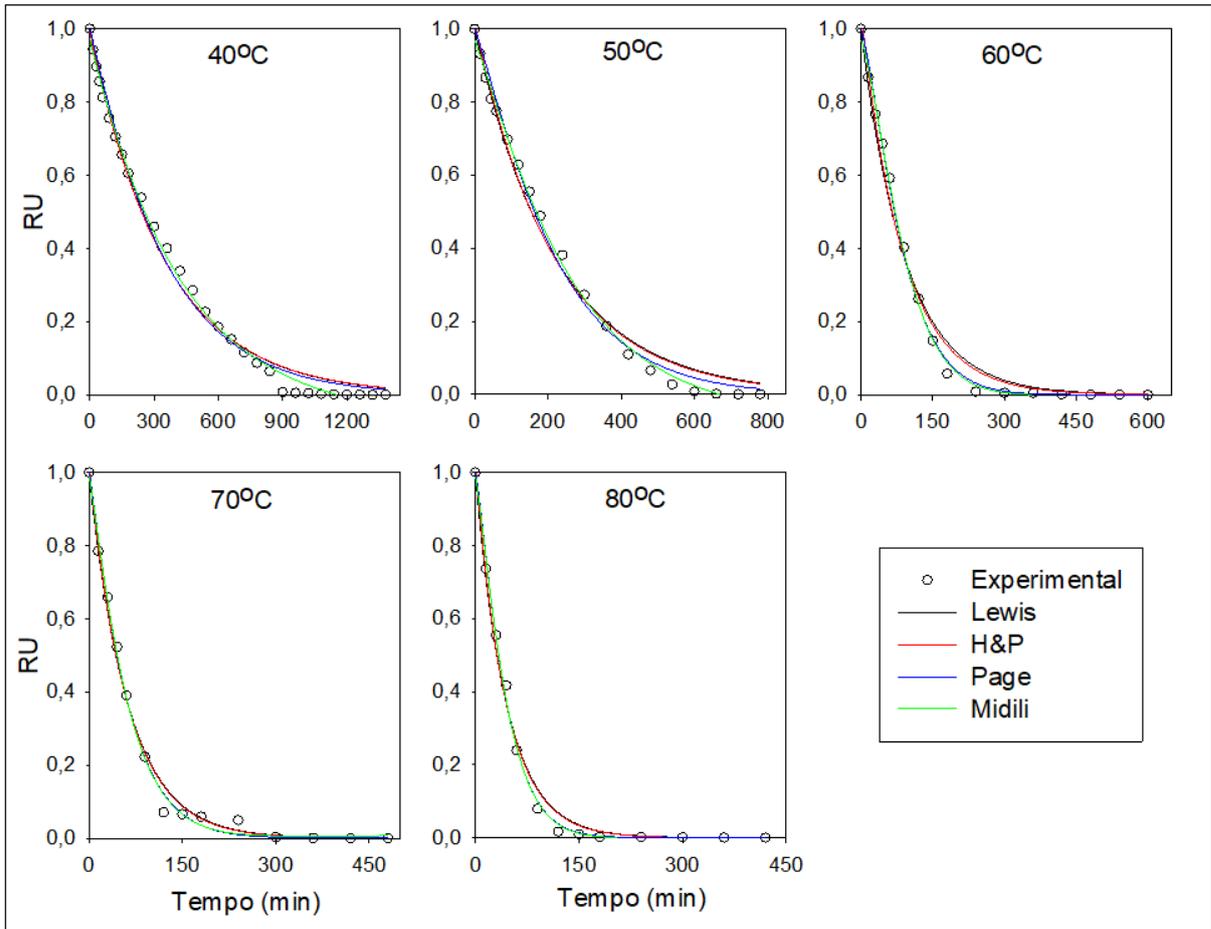


Figura 19- Curvas de secagem em leito de espuma do extrato de beterraba em diferentes temperaturas do ar de secagem utilizando-se 2,4% de maltodextrina e 7,44% de emustab®.

Tabela 13- Parâmetros estimados, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da regressão para os modelos ajustados em diferentes temperaturas do ar de secagem utilizando-se 2,4% de maltodextrina e 7,44% de emustab®.

Temperatura	Modelo	k	a	n	b	$R_{aj}^2$	Erro Padrão
40°C	Lewis	0,0029	-	-	-	0,9919	0,0314
	H&P	0,0028	0,9923	-	-	0,9917	0,0318
	Page	0,0021	-	1,0521	-	0,9923	0,0307
	Midili	0,0022	0,9690	1,0250	-0,00004	0,9964	0,0209
50°C	Lewis	0,0045	-	-	-	0,9891	0,0378
	H&P	0,0046	1,0180	-	-	0,9890	0,0381
	Page	0,0020	-	1,1496	-	0,9935	0,0293
	Midili	0,0018	0,9680	1,1419	-0,00007	0,9968	0,0205
60°C	Lewis	0,0108	-	-	-	0,9856	0,0435
	H&P	0,0114	1,0501	-	-	0,9873	0,0409
	Page	0,0027	-	1,3038	-	0,9968	0,0204
	Midili	0,0018	0,9691	1,3808	-0,00001	0,9971	0,0196
70°C	Lewis	0,0161	-	-	-	0,9930	0,0284
	H&P	0,0164	1,0200	-	-	0,9929	0,0287
	Page	0,0091	-	1,1368	-	0,9952	0,0235
	Midili	0,0080	0,9880	1,1656	-0,00001	0,9955	0,0232
80°C	Lewis	0,0223	-	-	-	0,9912	0,0317
	H&P	0,0229	1,0265	-	-	0,9911	0,0318
	Page	0,0094	-	1,2224	-	0,9966	0,0197
	Midili	0,0085	0,9866	1,2442	-0,00001	0,9968	0,0196

Pode-se observar na Tabela 13 que o modelo de Midili foi o que melhor representou as cinéticas de secagem do extrato de beterraba em leite de espuma, com maiores valores de coeficiente de determinação ajustado e menores valores de erro padrão da regressão em todas as temperaturas testadas. Esse resultado também é observado na Figura 19, em que as curvas ajustadas pelo modelo de Midili foram as que mais se aproximaram dos dados experimentais em todas as temperaturas.

A razão de umidade reduziu rapidamente no início e, posteriormente, diminuiu lentamente à medida que se aumentava o tempo de secagem, conforme o mesmo comportamento da secagem da fase anterior. Resultados semelhantes foram obtidos por Goyal et al., (2007), Rocha (2013), Azizpour et al. (2014), Qadri e Srivastava (2015) e Maciel (2017).

Como o modelo de Midili também obteve o melhor ajuste para essa fase do experimento, utilizou-se o mesmo critério da etapa anterior para estimar o tempo de

secagem. Os resultados encontrados para o tempo de secagem nas diferentes temperaturas estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14- Tempos de secagem calculados pelo modelo de Midili para as diferentes temperaturas testadas.

Temperatura (°C)	Tempo de secagem (min)
40	1099,69
50	639,84
60	283,59
70	251,25
80	154,22

A partir desses resultados ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 19, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,9891.

$$t_s = 90,4074 + 16041,4689 e^{-0,06896 T} \quad (19)$$

Em que  $T$  é a temperatura de secagem, em °C, e  $t_s$  é o tempo de secagem, em min.

A Figura 20 mostra o tempo de secagem estimado pelo modelo dado pela Equação 19. Verifica-se que, dentro do intervalo de temperatura estudado, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor o tempo gasto para realizar a secagem do extrato de beterraba, em decorrência do maior gradiente de temperatura entre o ar e a espuma, da redução da umidade relativa do ar de secagem, do aumento da pressão de vapor d'água de equilíbrio e, principalmente, aumento da difusividade efetiva do vapor d'água. Comportamento semelhante foi observado por outros autores ao utilizarem o leite de espuma para a secagem de iogurte (KRASAEKOOPT; BHATIA, 2012), suco misto (ROCHA, 2013), polpa de goiaba (CRUZ, 2013), melão (SALAH; MOHEBBI; TAGUIZADEH, 2015), graviola (BAPTESTINI, et al. 2015), abacate (ALVES; RODOVALHO, 2016), manga (LOBO et al., 2017) e extrato de café (Maciel, 2017).

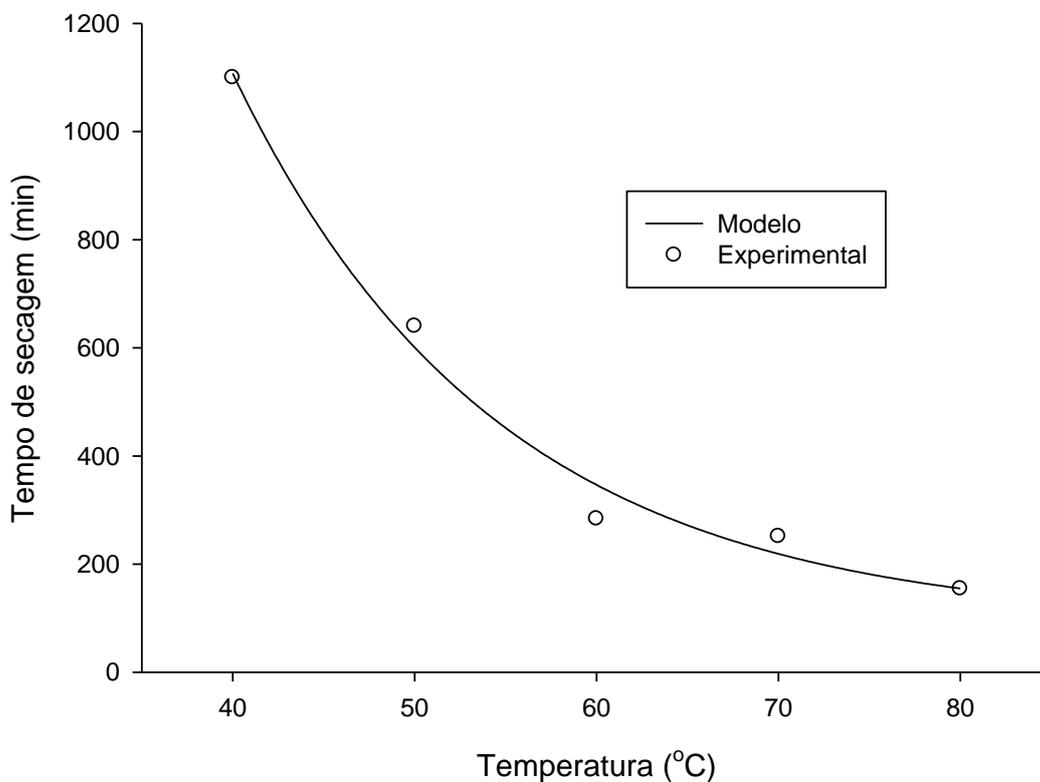


Figura 20- Tempo de secagem em leito de espuma dos extratos de beterraba em função das diferentes temperaturas do ar de secagem.

### 5.2.2 Solubilidade

Constatou-se que a temperatura do ar de secagem não exerceu influência significativa ( $p > 0,05$ ) na variável resposta solubilidade (Tabela 15). O valor médio para a solubilidade foi de 74,13% e o coeficiente de variação foi de 7,33%. Resultados semelhantes foram observados por Maciel (2017), ao verificar que a temperatura do ar no processo de secagem em leito de espuma de extrato de café não apresentou efeito significativo sobre a solubilidade dos pós obtidos.

Tabela 15- Análise de variância para a resposta solubilidade.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Temperatura	4	110,894	27,723	1,63320 <sup>ns</sup>	0,240911
Resíduo	10	169,749	16,975		
Total	14	280,642			

<sup>ns</sup>: Não Significativo ( $p > 0,05$ )

### 5.2.3 Tempo de molhabilidade

A temperatura do ar de secagem exerceu influência significativa ( $p < 0,05$ ) na variável resposta tempo de molhabilidade (Tabela 16).

Tabela 16- Análise de variância para a resposta tempo de molhabilidade

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Temperatura	4	1,15E+10	2,86E+09	3309,99*	0,0000
Resíduo	10	8,65E+06	8,651E+05		
Total	14	1,15E+10			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ )

Para estimar o tempo de molhabilidade do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem, ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 20, o qual apresentou coeficiente de determinação igual a 0,9048.

$$\hat{Y} = 757153,9651 e^{-0,06054 T} \quad (20)$$

Em que  $T$  é a temperatura de secagem, em °C, e  $\hat{Y}$  é o tempo de molhabilidade, em segundos.

A Figura 21 mostra a tempo de molhabilidade estimada pelo modelo dado pela Equação 20. Verifica-se que, dentro do intervalo de temperatura estudado, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor o tempo de molhabilidade. Maciel (2017) observou um efeito inverso na secagem de extrato de café em leite de espuma, em que a tempo de molhabilidade foi maior nas maiores temperaturas do ar de secagem.

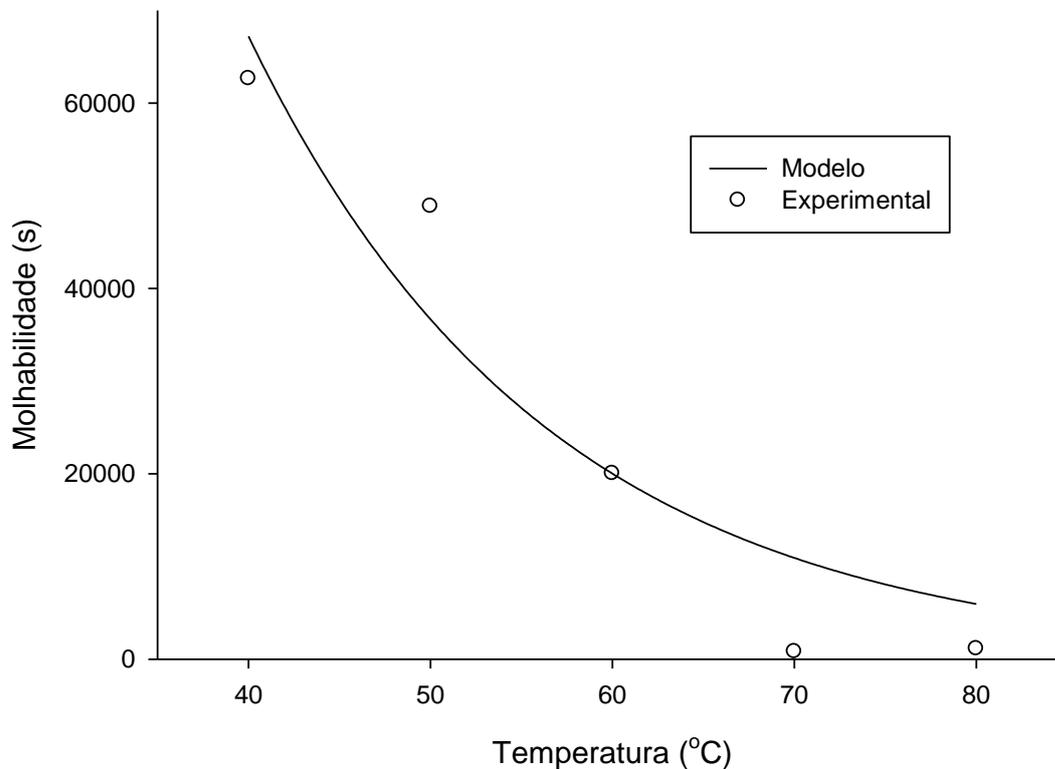


Figura 21- Tempo de molhabilidade do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem.

#### 5.2.4 Teor de água

A temperatura do ar de secagem exerceu influência significativa ( $p < 0,05$ ) na variável resposta teor de água (Tabela 17).

Tabela 17- Análise de variância para a resposta teor de água

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Temperatura	4	27,3628	6,8407	26,181*	0,00003
Resíduo	10	2,6129	0,2613		
Total	14	29,9756			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ )

Para estimar o teor de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem, ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 21, o qual apresentou coeficiente de determinação igual a 0,9265.

$$\hat{Y} = 0,9797 + 14,7381 e^{-0,0191 T} \quad (21)$$

Em que  $T$  é a temperatura de secagem, em °C, e  $\hat{Y}$  é o teor de umidade, em %.

A Figura 22 mostra o teor de água estimada pelo modelo dado pela Equação 21. Pode-se observar que, dentro do intervalo de temperatura testado, quanto maior a temperatura de secagem, menor o teor de água dos pós. Isto ocorre porque o teor de água de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura e, principalmente, porque com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da umidade relativa do ar. Outros autores observaram comportamento semelhante (SILVA et al., 2008; AZIZPOUR; MOHEBBI; PARAST, 2016; ASOKAPANDIAN et al., 2016; MACIEL, 2017).

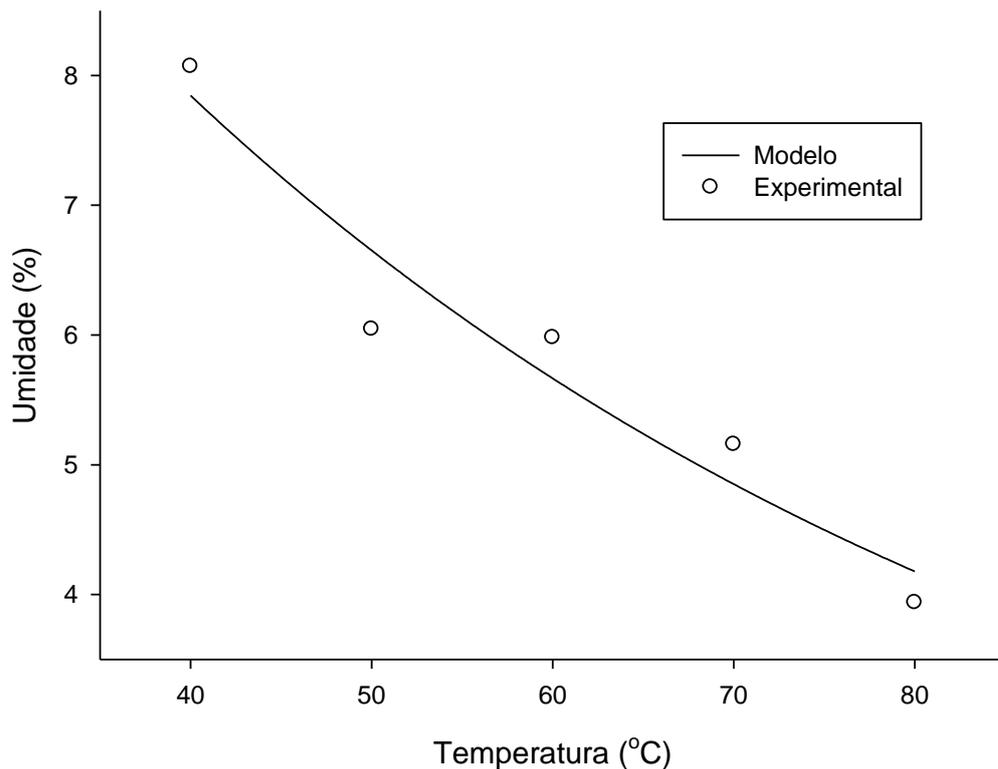


Figura 22- Teor de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem.

### 5.2.5 Atividade de água

A temperatura do ar de secagem exerceu influência significativa ( $p < 0,05$ ) na variável resposta atividade de água (Tabela 18).

Tabela 18- Análise de variância para a resposta atividade de água

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Temperatura	4	0,1280	0,0320	199,7400*	0,0000
Resíduo	10	0,0016	0,0002		
Total	14	0,1296			

\*: Significativo ( $p < 0,05$ )

Para estimar a atividade de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem, ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 22, o qual apresentou coeficiente de determinação igual a 0,9850.

$$\hat{Y} = 0,1304 + 2,9179 e^{-0,0585 T} \quad (22)$$

Em que  $T$  é a temperatura de secagem, em  $^{\circ}\text{C}$ , e  $\hat{Y}$  é a atividade de água do extrato de beterraba desidratado, adimensional.

A Figura 23 mostra a atividade de água estimada pelo modelo dado pela Equação 22. Nota-se que a variável resposta atividade de água obteve comportamento semelhante quando comparado ao do teor de água. Dentro do intervalo de temperatura estudado, os valores de atividade de água estimados pelo modelo variam de 0,16 a 0,41. Ng e Sulaiman (2018) encontraram valores de atividade de água entre 0,39 a 0,45 para o pó de beterraba produzido em leite de espuma, próximos aos valores observados de atividade de água obtidos a menores temperaturas de secagem neste trabalho.

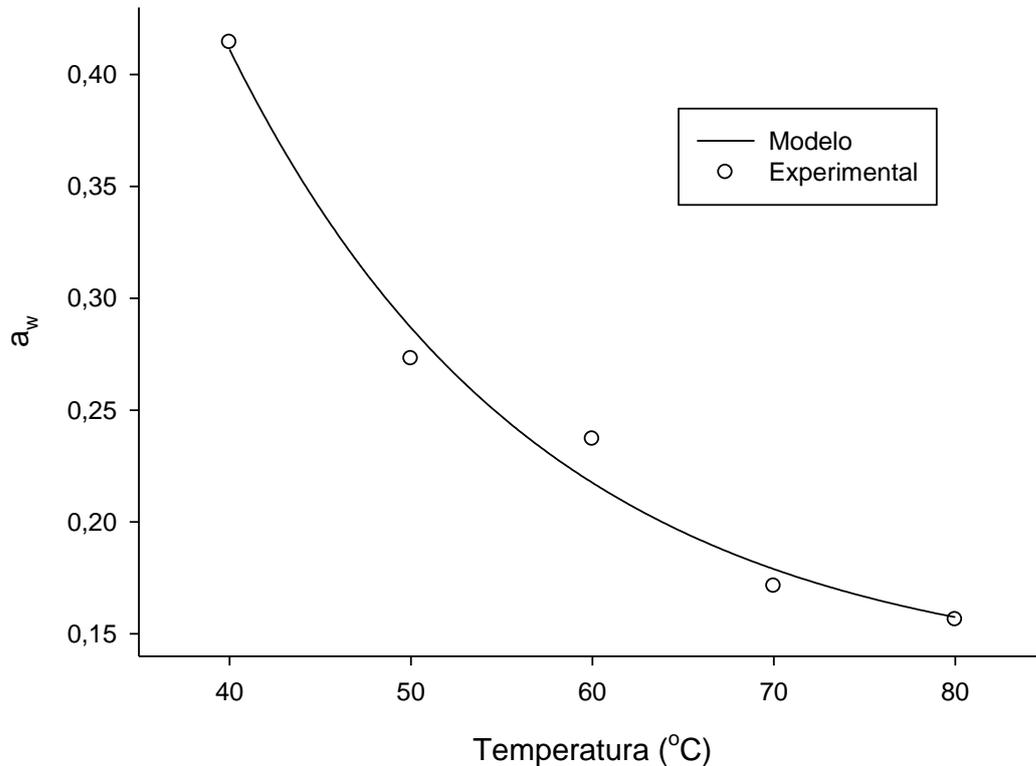


Figura 23- Atividade de água do extrato de beterraba desidratado em função da temperatura do ar de secagem

### 5.2.6 Cinética do consumo de energia

Para modelar a cinética do consumo de energia do secador ao longo do processo de secagem nas diferentes temperaturas testadas, o modelo exponencial dado pela Equação 23 foi utilizado. A escolha desse modelo deu-se com base na observação do comportamento gráfico dos dados experimentais.

$$\hat{Y} = a (1 - e^{-b t^n}) \quad (23)$$

Em que  $t$  é o tempo após o início da secagem, em min,  $\hat{Y}$  é o consumo de energia, em Wh, e  $a$ ,  $b$  e  $n$  são parâmetros do modelo.

Na Figura 24 estão apresentadas as cinéticas de consumo de energia para as diferentes temperaturas testadas, bem como as curvas simuladas pelos modelos

ajustados. Na Tabela 19 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados e o coeficiente de determinação para cada modelo, em cada tratamento testado.

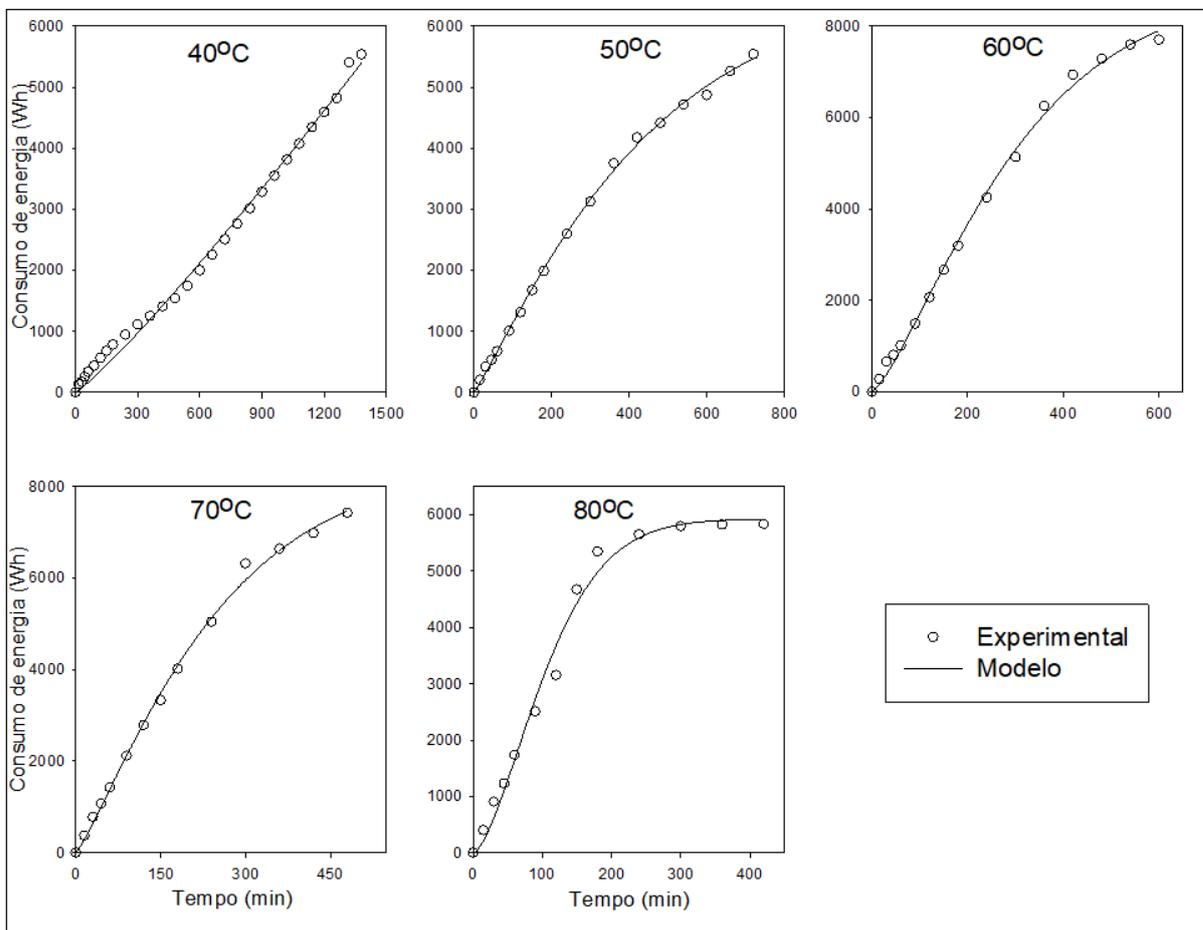


Figura 24- Cinética do consumo de energia do processo de secagem em leite de espuma do extrato de beterraba em diferentes temperaturas do ar de secagem.

Tabela 19- Parâmetros estimados e coeficiente de determinação para os modelos ajustados para o consumo de energia em diferentes temperaturas do ar de secagem

Temperatura	a	b	n	$R^2$
40°C	22483710,58	0,00000007213	1,1219	0,9941
50°C	6671,56	0,001070	1,1216	0,9987
60°C	8770,33	0,0005038	1,3178	0,9974
70°C	8491,91	0,001342	1,1929	0,9975
80°C	5925,66	0,0005249	1,5712	0,9893

Pode-se observar na Figura 24 que o modelo proposto representou bem as cinéticas de consumo de energia do processo de secagem do extrato de beterraba

em leito de espuma, o que pode ser confirmado com os elevados valores de coeficiente de determinação, mostrados na Tabela 19, em todas as temperaturas testadas.

Para estimar o consumo de energia necessário para atingir a umidade de equilíbrio em cada temperatura testada, substituiu-se os tempos de secagem apresentados na Tabela 14 nos modelos ajustados para o consumo de energia. A Tabela 20 mostra os resultados do consumo de energia em cada temperatura.

Tabela 20- Consumos de energia calculados pelo modelo da Equação 23 para as diferentes temperaturas testadas.

Temperatura (°C)	Consumo de energia (Wh)
40	4187,33
50	4684,89
60	5057,95
70	5301,79
80	5420,5

A partir desses resultados, ajustou-se o modelo matemático apresentado na Equação 24, o qual apresentou um coeficiente de determinação de 0,9956.

$$E = 5984,63 (1 - e^{-0,03046 T}) \quad (24)$$

Em que  $T$  é a temperatura de secagem, em °C, e  $E$  é o consume de energia, em Wh.

A Figura 25 mostra o consumo de energia estimado pelo modelo dado pela Equação 24. Verifica-se que, dentro do intervalo de temperatura estudado, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior o consumo de energia.

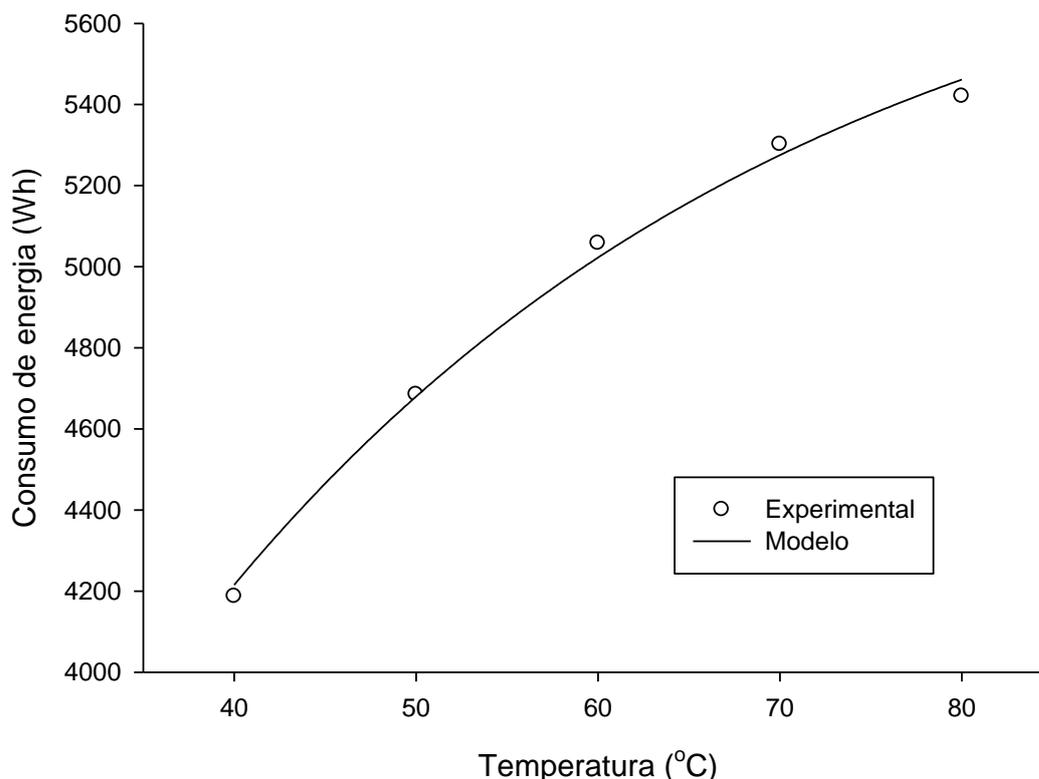


Figura 25- Consumo de energia em função da temperatura do ar de secagem.

### 5.2.7 Parâmetros instrumentais de cor

Constatou-se que a temperatura do ar de secagem não exerceu influência significativa ( $p > 0,05$ ) nas variáveis respostas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  (Tabela 21). O valor médio para os parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  para os pós obtidos foram 44,15, 8,12 e -0,23, respectivamente.

Tabela 21- Análise de variância para os parâmetros instrumentais de cor dos extratos de beterraba desidratados.

Parâmetro instrumental	F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
$L^*$	Temperatura	4	12,33	3,0825	2,2783 <sup>ns</sup>	0,1327
	Resíduo	10	13,53	1,3530		
$a^*$	Temperatura	4	44,5834	11,1458	3,1565 <sup>ns</sup>	0,0639
	Resíduo	10	35,3103	3,5310		
$b^*$	Temperatura	4	4,6424	1,1606	2,3492 <sup>ns</sup>	0,1246
	Resíduo	10	4,9405	0,4941		

<sup>ns</sup>: Não significativo ( $p > 0,05$ ).

### 5.2.8 Atividade antioxidante (ABTS)

Constatou-se que a temperatura do ar de secagem não exerceu influência significativa ( $p > 0,05$ ) na variável resposta atividade antioxidante (Tabela 22). O valor médio para a atividade antioxidante foi de  $6,8216 \mu\text{M Trolox g}^{-1}$  e o coeficiente de variação foi de 58,94%. Outros autores observaram efeito não significativo da temperatura do ar de secagem sobre a atividade antioxidante dos pós obtidos (LIMA, 2016; MACIEL, 2017).

Tabela 22- Análise de variância para a resposta atividade antioxidante (ABTS)

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Temperatura	4	86,0056	21,5014	1,5323 <sup>ns</sup>	0,2657
Resíduo	10	140,3235	14,0323		
Total	14	226,3291			

<sup>ns</sup>: Não Significativo ( $p > 0,05$ )

### 5.2.9 Otimização da temperatura de secagem pela função desejabilidade

Para o processo de otimização, as variáveis atividade de água, tempo de molhabilidade, tempo de secagem e consumo energético devem ser minimizadas. Uma vez que a temperatura de secagem não influenciou nas variáveis atividade antioxidante e solubilidade, estas não foram incluídas no processo de otimização. Nos cálculos da desejabilidade individual, o valor alvo (T) considerado foi o valor mínimo estimado para as variáveis respostas pelos modelos ajustados dentro do intervalo de temperatura de secagem estudado e o limite superior admissível (U) foi o valor máximo estimado dentro do mesmo intervalo. Os valores estabelecidos para as variáveis utilizadas estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23- Valores limite das variáveis resposta utilizadas na função desejabilidade.

Variáveis resposta	T	U
Tempo de secagem	154,89	1107,49
Tempo de molhabilidade	5966,12	67210,65
Atividade de água	0,16	0,41
Consumo de energia	4215,24	5461,50

Após realizar os cálculos da desejabilidade, obteve-se o gráfico (Figura 26), da desejabilidade global definida de acordo com os valores limites escolhidos. A desejabilidade máxima foi igual a 0,6384, a qual ocorreu na temperatura de 60,96 °C. Nessa temperatura de secagem, obtém-se o conjunto de respostas mais satisfatório, estabelecendo um ponto ótimo do processamento, dentro da região estudada.

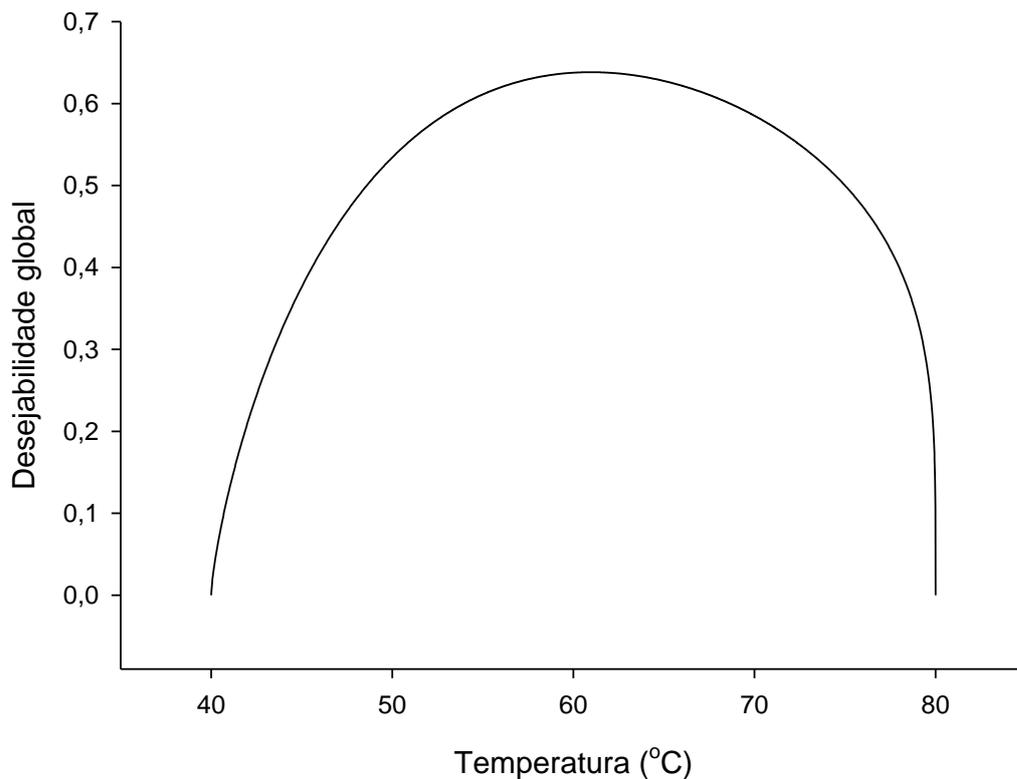


Figura 26- Desejabilidade global em função da temperatura do ar para o processo de secagem em leito de espuma de extrato de beterraba.

## 6. CONCLUSÃO

As concentrações dos aditivos (maltodextrina e Emustab®) utilizados para a formação da espuma de beterraba influenciaram significativamente na massa específica e estabilidade da espuma.

As melhores concentrações dos agentes espumantes para otimizar a secagem de extrato de beterraba em leite de espuma, através da função desejabilidade, nas condições estudadas foram de 2,40% de maltodextrina e 7,44% de Emustab®.

Com os resultados obtidos para secagem do extrato aquoso de beterraba, pode-se concluir que o modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Notou-se que com o aumento da temperatura do ar de secagem, o tempo de secagem diminuiu.

Observou-se que a elevação da temperatura de secagem ocasiona maior consumo de energia.

A temperatura do ar de secagem exerceu influência nas respostas tempo de molhabilidade, umidade e atividade de água, por outro lado, as condições de temperatura de secagem não afetaram significativamente as respostas solubilidade, parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) e atividade antioxidante.

Encontrou-se, através da função desejabilidade, a temperatura ótima de 60,96°C para a secagem do extrato de beterraba.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCSEM. Associação Brasileira Do Comércio De Sementes e Mudas. **2º levantamento dos dados socioeconômicos da cadeia produtiva de hortaliças no Brasil Ano Base 2012**. Disponível em <http://www.abcsem.com.br/dados-do-setor> Acesso em 01 mar. 2018.

AKINTOYE, O. A.; OGUNTUNDE, A. O. Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soymilk. **Drying Technology**, v. 9, n. 1, p. 245-262, 1991.

AKPINAR, E.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modelling. **Energy Conversion Management**, v. 44, n. 10, p. 1689–1705, 2003.

AKPINAR, E.K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin-layer drying of red pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 1, p. 99-104, 2006.

ALVES, J. J. L.; RODOVALHO, R. S. Cinética de secagem em camada de espuma da polpa de abacate cv 'quintal' (*Persea Americana* Mill). **Revista Agrotecnologia**, v. 7, n. 1, p. 86-98, 2016.

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

AZEREDO, H. M. C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, n. 12, p. 2365–2376, 2009.

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H. Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 34, n. 1, p. 122–126, 2016.

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. H.; VARIDI, M. Optimization of foam parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). **Drying Technology**, v. 32, n. 4, p. 374–384, 2014.

BANDYOPADHYAY, M.; CHAKRABORTY, R.; RAYCHAUDHURI, U. A process for preparing a natural antioxidant enriched dairy product (Sandesh). **LWT-Food Science and Technology**, v. 40, n. 5, p. 842–851, 2007.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D. B.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 12, p. 1203–1208, 2015.

BAPTISTA, R. F. **Avaliação da qualidade interna de ovos de codorna (coturnix coturnix japonica) em função da variação de temperatura de armazenamento.** 2002. 99p (Dissertação de mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.

BARBOSA, F. F.; ELIAS, M. C.; FAGUNDES, C. A. A.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, F. M.; DIONELLO, R. G. Manejo térmico do ar na secagem estacionária e seus efeitos no desempenho industrial de arroz branco e parboilizado. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 27, n. 2, p. 271-280, 2009.

BASTOS, D. S.; SOARES, D. M. B. G.; ARAÚJO, K. G. L.; VERRUMABERNARDI, M. R. Desidratação da polpa de manga “tommy atkins” utilizando a técnica de foam mat drying - avaliações químicas, físico-químicas e sensoriais. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 4, p. 283-290, out./dez. 2005.

BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G. S. V.; RATTI C.; RENNIE T. J. Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. **Drying Technology**, v. 22, n. 3, p. 521–539, 2004.

BEKE, J.; MUJUMDAR, A. S.; GIROUX, M. Some fundamental attributes of corn and potato drying in microwave fields. **Drying Technology**, v. 15, n. 2, p. 539-554, 1997.

BRASIL. Ministério da saúde – Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Resolução nº 388, de 05 de Agosto de 1999. **Aprova o Regulamento Técnico “Atribuição de aditivos e seus limites máximos para a categoria de alimentos 19: Sobremesas”.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 05 ago. 1999.

BRENNAN, J. G. **Food Processing Handbook.** Weinheim: Wiley VCH, 2006.

BRYGIDYR, A. M.; RZEPECKA, M. A.; MCCONNELL, M. B. Characterization and drying of tomato paste foam by hot air and microwave energy. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, v. 10, n. 4, p. 313-319, 1977.

CABRAL, R. A. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; FINZER, J. R. D. Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 4, p. 1096-1106, 2007.

CAI, Y.; CORKE, H. Amaranthus betacyanin pigments applied in model food systems. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 5, p. 869–873, 1999.

CAI, Y.; SUN, M.; CORKE, H. Antioxidant activity of betalains from plants of the amaranthaceae. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 8, p. 2288-2294, 2003.

CAI, Y.; SUN, M.; CORKE, H. Characterization and application of betalain pigments from plants of the Amaranthaceae. **Trends in Food Science & Technology**, v. 16, n. 6, p. 370–376, 2005.

CAMARGO, P.; MORAES, C.; CANTERI, M. H. G.; FRANCISCO, A. C.; MAIA, L. **Avaliação da desidratação da polpa do maracujá azedo pelo método “foam mat”**. In: VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa - PR, v. 2, n. 14, 2008.

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

CANO-CHAUCA, M., RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C.; MARQUES, J. A. SILVA, P. I. Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 22, n. 1, p. 121-132, 2004.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CAL-VIDAL, J. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, Oxford, v. 5, n. 4, p. 420-428, 2005.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CARVALHO, M. S. **Produção de polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma**, 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

CEREZAL, M. P.; NÚÑEZ, L. D. Caracterización del colorante de remolacha roja (*Beta vulgaris* L.) em polvo. **Alimentaria**, v. 1, n. 269, p. 91-94, 1996.

CEREZAL, M. P.; PINO, A. J.; SALABARRIA, Y. Red beet (*Beta vulgaris* L.) colourant stability in the form of a concentrated liquor. **Tecnologia Alimentaria**, v. 29, n. 1, p. 7–16, 1994.

CHATTOPADHYAY, P.; CHATTERJEE, S.; SEN, S. K. Biotechnological potential of natural food grade biocolorants. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 17, p. 2972–2985, 2008.

CHEN, X. D.; MUNJUMDAR, A. S.; **Drying Technologies in food processing**. Singapura: Blackwell, 2008. 322p.

CHUA, K. J; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K.; HAWLADER, M. N. A.; HO, J. C. Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. **Drying Technology**, v. 18, n. 4-5, p. 907–936, 2000.

COUMANS, W. J. **Power law diffusion in drying processes**. 1987. Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 1987.

CRUZ, C. W. F. **Obtenção de polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó pelo método de secagem em camada de espuma**. 2013. Dissertação (Mestrado em

Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

DANTAS, H. J.; SILVA, A. S.; LIMA, E. E.; FARIAS, P. A.; ANDRADE, M. A. **Obtenção da polpa de jaca em pó pelo método de secagem em camada de espuma (foam-mat drying)**. In: III Jornada Nacional da Agroindústria. Bananeiras - PB, 2008.

DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

EISNER, M. D.; JEELANI, S. A. K.; BERNHARD, L.; WINDHAB, E. J. Stability of foams containing proteins, fat particles and nonionic surfactants. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 7, p. 1974-1987, 2007.

ESATBEYOGLU, T.; WAGNER, A. E.; SCHINI-KERTH, V. B.; RIMBACH, L. Betanina food colorant with biological activity. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 59, n. 1, p. 36–47, 2015.

ESCRIBANO, J.; GANDÍA-HERRERO, F.; CABALLERO, N.; PEDREÑO, M. A. Subcellular localization and isoenzyme pattern of peroxidase and polyphenol oxidase in beet root (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 20, p. 6123-6129, 2002.

FELLOWS, P. **Food processing technology**. Principles and Practice, 2 Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

FERNANDES, R. V. B.; BORGES, S. V.; BOTREL, D. A. Gum arabic/starch/maltodextrin/inulin as wall materials on the microencapsulation of rosemary essential oil. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, p. 524-532, 2014.

FERREIRA, N. A. **Aproveitamento de resíduos do processamento mínimo de beterraba: elaboração de produtos tecnológicos, avaliação sensorial, físico-química e de compostos funcionais**. 2010. 149f. Dissertação (Mestrado em Nutrição Humana) - Universidade Federal de Brasília, Brasília-DF, 2010.

FERREIRA, N. A.; LOPES, S. B.; MORETTI, C. L.; MATTOS, L. M. **Processamento mínimo de mini beterraba**. Comunicado Técnico 73, Brasília: Embrapa, 2009. 5p.

FIGLIARO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2004. 230p.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder technology**, v. 206, n. 1-2, p. 72-78, 2011.

FRANCIS, F. J. **Encyclopedia of Food Science and Technology**. 2 Ed. New York: John Wiley & Sons. v. 4, 1999.

FREITAS, R. C. P. **Caracterização do processo de secagem em leito de espuma para obtenção de pó de manga Ubá**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2016.

FURTADO, G. F.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; SANTOS, P. Secagem de polpa de ceriguela pelo método de camada de espuma. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande - PB, v. 12, n. 1, p. 9-14, 2010.

GEANKOPLIS, C. J.; **Processo de transporte e operações unitárias**. 3 ed. 2003. 1026p.

GENGATHARAN, A.; DYKES, G. A.; CHOO, W. S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT - Food Science and Technology**, v. 64, n. 2, p. 645–649, 2015.

GEORGIEV, V. G.; WEBER, J.; KNESCHKE, E. M.; DENEV, P. N.; BLEY, T.; PAVLOV, A. I. Antioxidant activity and phenolic content of betalain extracts from intact plants and hairy root cultures of the red beetroot *Beta Vulgaris* CV. Detroit Dark Red. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 65, n. 2, p. 105–111, 2010.

GONÇALVES, L. C. P.; MARCATO, A. C.; RODRIGUES, A. C. B.; PAGANO, A. P. E.; FREITAS, B. C.; MACHADO, C. O.; NAKASHIMA, K. K.; ESTEVES, L. C.; LOPES, N. B.; BASTOS, E. L. Betalainas: das cores à fluorescência das flores. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n.1, p. 292-309, 2015.

GOYAL, R. K.; KINGSLEY, A. R. P.; MANIKANTHAN, M. R.; ILYAS, S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. **Journal Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 176–180, 2007.

GURJÃO, K. C. V. **Desenvolvimento, armazenamento e secagem de tamarindo (*Tamarindus indica* L.)**. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia - PB, 2006.

HART, M. R.; GRAHAM, R. P.; GINETTE, L. F.; MORGAN, A. I. **Food Technology**, v. 17, n. 10, p. 90–92, 1963.

HASSAN, M.; AHMED, J. Sensory quality of foam-mat dried pineapple juice powder, **Indian Food Packer**, v. 52, n. 7, p. 31-33, 1998.

HAWALDER, M. N. A.; PERERA, CO; TIAN, M. Propriedades de alimentos secos com bomba de calor de atmosfera modificada. **Journal of Food Engineering**, v. 74, p. 392 – 401, 2006.

HERNANDES, N. K.; CONEGLIAN, R. C. C.; GODOY, R. L. O.; VITAL, H. C.; FREIRE JUNIOR, M. Testes sensoriais de aceitação da beterraba vermelha (*Beta vulgaris ssp. vulgaris* L.), cv. Early Wonder, minimamente processada e irradiada.

**Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, p. 64-68, ago. 2007. Suplemento.

HERTZENDORF, M. S.; MOSHY, R. J. Foam drying in the food industry. **CRC Critical Review in Food Technology**, v. 1, n. 1, p. 25-70, 1970.

HUNTERLAB. **CIE L\*a\*b\* color scale: applications note**, v.8, n.7, 1996. Acesso em 10 dez. 2017. Disponível na internet: [http://www.hunterlab.com/color\\_theory.php](http://www.hunterlab.com/color_theory.php)

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Censo Agropecuário 2006**. IBGE: Rio de Janeiro, 2009. 777p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 1ª Edição Digital, 2008.

JAKUBCZYK, E.; GONDEK, E.; TAMBOR, K. **Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method, food process engineering in a changing world**. In proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food, p. 1385-1386, 2011.

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

KADAM, D. M.; WILSON, R. A.; KAUR, S. Determination of biochemical properties of foam-mat dried mango powder. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 1626-1632, 2010.

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

KALETA, A.; GÓRNICKI, K.; WINICZENKO, R.; CHOJNACKA, A. Evaluation of drying models of apple (*var. Ligoł*) dried in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 67, p. 179-185, 2013.

KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S. Foam-mat drying of Papaya (*Carica papaya* L.) using glycerol monostearate as foaming agent. **Food Science and Quality Management**, v. 9, n. 1, p. 17-27, 2012.

KANNER, J.; HAREL, S.; GRANIT, R. Betalains: a new class of dietary cationized antioxidants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 11, p. 5178-5185, 2001.

KAPADIA, G. J.; AZUINE, M. A.; SRIDHAR, R.; OKUDA, Y.; TSURUTA, A.; ICHIISHI, E.; MUKAINAKE, T.; TAKASAKI, H.; KONOSHIMA, T.; NISHINO, H.; TOKUDA, H. Chemoprevention of DMBA-induced UV-B promoted, NOR-1-induced TPA promoted skin carcinogenesis, and DEN-induced Phenobarbital promoted liver tumors in mice by extract of beetroot. **Pharmacological Research**, v. 47, n. 4, p. 141-8, 2003.

KAPOOR, V. P.; KATIYAR, K.; PUSHPANGADAN, P.; SINGH, N. Development of natural dye based sindoor. **Natural Product Radiance**, v. 7, n. 1, p. 22–29, 2008.

KARIM, A. 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.

KRASAEKOOPT, W.; BHATIA, S. Production of yogurt powder using foam-mat drying. **Journal of Technology**, v. 15, n. 3, p. 166-171, 2012.

KUDRA, T.; RATTI, C. Foam-mat drying: Energy and cost analyses. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 48, p. 327-332, 2006.

KUMAR, S.; BROOKS, M. S. L. Use of red beet (*beta vulgaris* L.) for antimicrobial applications - a critical review. **Food Bioprocess Technology**, v. 11, n. 2, p.17-42, 2018.

LANGE, W.; BRANDENBURG, W. A.; BOCK, T. S. M. Taxonomy and cultonomy of beet (*Beta vulgaris* L.). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 130, n. 1, p. 81–96, 1999.

LANNES, S. C. S.; MEDEIROS, M. L. Processamento de achocolatado de cupuaçu por spray-dryer. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 39, n. 1, p. 115-123, 2003.

LIMA, E. M. F. **Microencapsulamento por spray dryer de antocianinas e polifenóis de jussara (*Euterpe edulis* MARTIUS) e incorporação em sistemas-modelo de bebida lácteas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES, 2016.

LOBO, F. A.; NASCIMENTO, M. A.; DOMINGUES, J. R.; FALCÃO, D. Q.; HERNANZ, D.; HEREDIA, F. J.; ARAUJO, K. G. L. Foam mat drying of Tommy Atkins mango: Effects of air temperature and concentrations of soy lecithin and carboxymethylcellulose on phenolic composition, mangiferin, and antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 221, n. 1, p. 258–266, 2017.

MACHADO, A. V. **Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo**. 2009. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). 126 f. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

MACIEL, K. S. **Otimização das condições do processo de secagem do extrato de café em leite de espuma e aplicação em mistura para cappuccino**. 2017. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre- ES, 2017.

MANCHALI, S.; MURTHY, K. N. C.; NAGARAJU, S.; NEELWARNE, B. Stability of betalain pigments of red beet. In: NEELWARNE, B. (Ed.), **Red beet biotechnology: food and pharmaceutical applications**. Springer: New York, 2012. p. 55-74.

MARQUES, G. M. R. **Secagem de caldo de cana em leito de espuma e avaliação sensorial do produto**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga-BA, 2009.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 61, n. 3, p. 373-386, 2004.

MAZZA, G. Dehydration of carrots: Effects of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. **Journal of Food Technology**, v. 18, n. 1, p. 113-123, 1983.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**. v. 52, n. 3, p. 1644-1649, 2011.

MINK, L. D. **Egg material treatment**. US Patent 2183516, 1939.

MINK, L. D. **Treatment of egg whites**. US Patent 2200963, 1940.

MORAES, M. L. B. **Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz**. 2000. 50f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de sementes) – UFPel- Rio Grande do Sul, 2000.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

MORGAN, A. I.; GRAHAM, R. P.; GINETTE, L. F.; WILLIAMS, G. S. Recent developments in foam-mat drying. **Food Technology**, v. 15, p. 37-39, 1961.

NG, M. L.; SULAIMAN, R. Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 88, n. 1, p. 80–86, 2018.

NIJHUIS, H. H.; TORRINGA, H. M.; MURESAN, S.; YUKSEL, D.; LEGUIJT, C.; KLOEK, W. Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. **Trends Food Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 13–20, 1998.

NINDO, C. I.; SUN, T.; WANG, S. W.; TANG, J.; POWERS, J. R. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, v. 36, n. 5, p. 507-516, 2003.

PAI, S. R.; D'MELLO, P. Stability evaluation of beetroot colour in various pharmaceutical matrices. **Indian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 66, p. 696–699, 2004.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PASCH, J. H.; VON ELBE, J. H.; SELL, R. J. Betalaines as colorants in dairy products. **Journal of Milk and Food Technology**, v. 38, n. 1, p. 25–28, 1975.

PEREIRA, D. A. **Extração aquosa de própolis e secagem em leite de espuma para uso em alimentos**. 2008. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2008.

PIERONI, A.; MUENZ, H.; AKBULUT, M.; BAŞER, K. H. C.; DURMUŞKAHYA, C. Traditional phytotherapy and trans-cultural pharmacy among Turkish migrants living in Cologne, Germany. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 102, n. 1, p. 69–88, 2005.

PINEDO, A. A. **Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*curbíta máxima*): Estudo das características do processo**. 2003. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

QADRI, O. S.; SRIVASTAVA, A. K. Microwave-assisted foam mat drying of guava pulp: drying kinetics and effect on quality attributes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 1, p. 1-8, 2015.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59p.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. V. 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.

RÉ, M. I. Microencapsulation by spray drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 16, n. 6, p. 1195-1236, 1998.

ROCHA, C. T. **Desenvolvimento de suco misto de açaí, morango e acerola em pó**. 2013. 79f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES, 2013.

ROCKWELL, W. C.; LOWE, E.; MORGAN, A.I.; GRAHAM, R.P.; GINETTE, L.F. **Food Engineering**, v. 34, n. 8, p. 86, 1962.

SAGAR V. R.; KUMAR, S. P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 15–26, 2010.

SAINATH, M. Formulation and evaluation of herbal lipstick. **International Journal Of Advanced Research In Medical & Pharmaceutical Sciences**, v. 1, n. 1, p. 14–19, 2016.

SALAH, M. R.; MOHEBBI, M.; TAGHIZADEH, M. Foam-mat drying of cantaloupe (*cucumis melo*): optimization of foaming parameters and investigating drying

characteristics. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 1798–1808, 2015.

SANGAMITHRA, A.; SIVAKUMAR, V.; SWAMY, G. J.; KANNAN, K. Foam mat drying of food materials: A review. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 6, p. 3165-3174, 2015.

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

SANTOS, C. D. **Extração, clarificação e estabilização de betalaínas provenientes de talos de beterraba vermelha (*Beta vulgaris* L.)**. 2017. 153f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SCOTT, J.; RÉBEILLÉ, F.; FLETCHER, J. Folic acid and folates: The feasibility for nutritional enhancement in plant foods. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, n. 7, p. 795–824, 2000.

SHAHID, M.; MOHAMMAD, F. Recent advancements in natural dye applications: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 53, n. 1, p. 310–331, 2013.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Desidratação de polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1899- 1905, 2008.

SINGH, B.; HATHAN, B. S. Chemical composition, functional properties and processing of beetroot - a review. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 5, n. 1, p. 679–684, 2014.

SNOW, L. F. Traditional health beliefs and practices among lower class black. **Americans Western Journal of Medicine**, v. 139, n. 6, p. 820–828, 1983.

SOARES, E. C.; OLIVEIRA, G. S. F. de; MAIA, G. A.; MONTEIRO, J. C. S.; SILVA JUNIOR, A.; FILHO, M. de S. S. Desidratação da polpa de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) pelo processo “foam-mat”. **Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas**, v. 21, n. 2, p. 164-170, 2001.

SOARES, E.C. **Caracterização de aditivos para secagem de araçá-boi (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh) em leite de espuma**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga - BA, 2009.

SOUZA, V. C. **Efeito da liofilização e desidratação em leite de espuma sobre a qualidade do pó de polpa de cupuaçu (*theobroma grandiflorum*)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga – BA, 2011.

STINTZING, F. C.; CARLE, R. Betalains – emerging prospects for food scientists. **Trends in Food Science & Technology**, v. 18, n. 10, p. 514 - 525, 2007.

STRACK, D.; VOGT, T.; SCHLIEMANN, W. Recent advances in betalain research. **Phytochemistry**, v. 62, n. 3, p. 247-269, 2003.

SYARIEF, A. M.; MOREY, R. V.; GUSTAFSON, R. J. Thin-layer drying rate of sunflower seed. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 1, p. 195-200, 1984.

Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO). 4ª ed. Campinas: **NEPA – UNICAMP**, 2011.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: Planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, v. 29, n. 2, p. 338-350, 2006.

TIVELLI, W. FACTOR, T. L.; TERAMOTO, J. R. S; FABRI, E. G.; MORAES, A. R. A.; TRANI, P. E.; MAY, A. Beterraba: do plantio à comercialização. **Série Tecnologia APTA, Boletim Técnico IAC 210**, 2011. 51p.

TONON, R. V. **Secagem por atomização do suco de açaí: Influência das variáveis de processo, qualidade e estabilidade do produto**. 2009. 242f. Tese (Doutorado em Engenharia de alimentos) - Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2009.

VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. **Handbook of food engineering practice**. 1. ed. Florida: CRC Press LLC, p. 143-158, 1997.

VILLELA, F. A. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. 1991.104f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Esalq-USP, Piracicaba-SP, 1991.

VINSON, J. A.; HAO, Y.; SU, X.; ZUBIK, L. Pheonol antioxidante quantity and quality in foods: vegetables. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, n. 9, p. 3630-3634, 1998.

VITTI, M. C. D.; KLUGE, R. A.; JACOMINO, A. P.; GROppo, V. D.; MORETTI, C. L. **Processamento mínimo de beterraba**. Comunicado Técnico 23, Brasília: Embrapa, 2004. 9p.

WEBB, A. J.; PATEL, N.; LOUKOGEORGAKIS, S.; OKORIE, M.; ABOUD, Z.; MISRA, S. Acute blood pressure lowering, vasoprotective, and antiplatelet properties of dietary nitrate via bioconversion to nitrite. **Hypertension**, v. 51, n. 3, p. 784-900, 2008.

WHITAKER, S. Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. **Advances in heat transfer**, v.13, n. 8, p. 119-203, 1977.

WAUGHON, T. S.; PENA, R. S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 26, n. 2, p. 297-306, 2008.

WILSON, R. A. KADAM, D. M.; CHADHA, S.; GREWAL, M. K.; SHARMA, M. Evaluation of physical and chemical properties of foam-mat dried mango (*Mangifera Indica*) powder during storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 38, n. 4, p. 1866–1874, 2014.

WOO, K. K.; NGOU, F. H.; NGO, L. S.; SOONG, W. K.; TANG, P. Y. Stability of betalain pigment from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus*). **American Journal of Food Technology**, v. 6, n. 2, p. 140–148, 2011.

WOOTTON-BEARD, P. C.; RYAN, L. A beetroot juice shot is a significant and convenient source of bioaccessible antioxidants. **Journal of functional foods**, v. 3, n. 2, p. 329–334, 2011.

ZIELINSKA-PRZYEMSKA, M.; OLEJNIK, A.; DOBROWOLSKA-ZACHWIEJA, A.; GRAJEK, W. In vitro Effects of beetroot juice and chips on oxidative metabolism and apoptosis in neutrophils from obese individuals. **Phytotherapy Research**. v. 23, n. 1, p. 49-55, 2009.