

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**RAFAEL FARIAS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DO SANGUE**  
**BOVINO**

**JOÃO PESSOA**

**2017**

**RAFAEL FARIAS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DO SANGUE  
BOVINO**

**JOÃO PESSOA**

**2017**

**RAFAEL FARIAS DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DO SANGUE BOVINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Josilene de Assis Cavalcante

Coorientador: Dr. Nagel Alves Costa

**JOÃO PESSOA**

**2017**

**RAFAEL FARIAS DE OLIVEIRA**

O48e Oliveira, Rafael Farias de.  
Estudo da secagem em camada de espuma do sangue bovino  
/ Rafael Farias de Oliveira. - João Pessoa, 2017.  
75 f. : il.

Orientadora: Dr.<sup>a</sup> Josilene de Assis Cavalcante.

Coorientador: Dr. Nagel Alves Costa.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT/PPGEQ

1. Engenharia Química - secagem. 2. Camada de Espuma.  
3. Sangue bovino. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 66.0(043)

# ESTUDO DA SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA DO SANGUE BOVINO

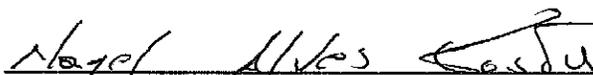
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em 22 de Agosto, de 2017.

## BANCA EXAMINADORA



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.ª Josilene de Assis Cavalcante – PPGEQ/CT/UFPB  
(Orientadora)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nagel Alves Costa – PPGEQ/CT/UFPB FPB  
(Co-orientador)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva – PPGEQ/CT/U  
(Examinador Interno)



\_\_\_\_\_  
Prof. Dr.ª Marta Suely Madruga – PPGCTA/CT/UFPB  
(Examinadora Externa)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelo dom da Vida e por ter me dado forças para chegar aqui.

A minha família por todo o apoio oferecido durante o mestrado, especialmente a minha Mãe por todo o esforço feito para que este dia chegasse e a minha mulher Katarina por ter me apoiado sempre e não deixado desistir, além da minha filha Maria que além de ser o bem mais precioso da minha vida se tornou um incentivo a mais durante essa jornada.

Ao PPGEQ por todo o apoio e dedicação em especial à minha orientadora professora Josilene, por todo o carinho e paciência desde o começo do curso.

Aos professores do PPGEQ em especial aos professores Nagel e Flávio pelas disciplinas ministradas e por todo o conhecimento passado.

A coordenação da pós por todos os auxílios, todos os serviços prestados e toda atenção a mim dada.

Ao Laboratório de Termodinâmica onde realizei os experimentos, ao Abatedouro Honorato & Araújo que disponibilizou o sangue bovino e a Amós e Palloma que me auxiliaram nesta pesquisa.

A todos os meus amigos de longas datas e novos que me apoiaram durante a realização do curso, não importando de que forma tenha sido.

A todos que de alguma forma me apoiaram durante esses 24 meses.

A CAPES pelo financiamento de 10 meses da pesquisa.

## RESUMO

O sangue bovino é um material que pode provocar sérios danos ao meio ambiente caso seja descartado de forma irregular na natureza, no entanto o sangue constitui um material com potencial de gerar novos produtos, caso seja corretamente processado, como o aproveitamento para produção da farinha de sangue. Com o objetivo de obter o sangue bovino em pó, foi empregada a técnica de secagem em camada de espuma, a qual o sangue líquido foi transformado em espuma com a adição de um agente espumante, o Emustab®, e levado para a secagem em estufa. Foi realizada a caracterização física da espuma do sangue bovino: densidade ( $\text{g/cm}^3$ ), porcentagem de expansão, capacidade de incorporação de ar e estabilidade da espuma além da análise de atividade de água, determinação do coeficiente de difusão e teor de proteína do pó obtido após a secagem. A secagem foi realizada com base nos níveis definidos em um planejamento experimental fatorial completo  $2^3 + 3$  pontos centrais. As variáveis de entrada foram: temperatura (50, 60 e  $70^\circ\text{C}$ ), concentração de Emustab® (3, 4,5 e 6%) e tempo de agitação (5, 7 e 9 min). As variáveis de saída estudadas foram: tempo de secagem (min) e umidade final do produto. A espessura da camada de espuma foi mantida constante em 1,0 cm. O rendimento do processo de secagem foi em média 30%, e o tratamento estatístico dos dados da cinética demonstrou que apenas a temperatura influencia de maneira significativa no tempo de secagem e na umidade final do produto. Com os dados da cinética foi possível obter ajustes de modelos matemáticos, onde os que apresentaram melhor ajuste foram os de Page, Dois Termos Exponencial e Wang e Singh para as três temperaturas utilizadas, onde seus coeficientes de determinação ficaram acima de 0,98 e erro padrão da estimativa abaixo de 0,4, sendo Page o melhor modelo dos três. O material apresentou valores elevados para o coeficiente de difusão, da ordem de  $10\text{E-}9$ , valores abaixo de 0,3 para atividade de água e teores de proteínas superiores a 85%. A melhor maneira para produção do sangue bovino em pó através do método em camada de espuma é utilizar a temperatura a  $70^\circ\text{C}$ , concentração de Emustab® de 3,0% e tempo de agitação de 5min, obtendo um material com teor de umidade em torno de 8% e proteína em torno de 85%, além de o tempo da secagem ser em média 190 min. O modelo que melhor se ajustou aos dados e escolhido para este material foi o de Page.

**Palavras-chave:** Subproduto; ajuste de modelo; coeficiente de difusão.

## ABSTRACT

Bovine blood is a material that can cause serious damage to the environment if it is disposed of irregularly in nature, however blood is a material with the potential to generate new products, if properly processed, such as blood powder. In order to obtain bovine powder, a foam-drying technique was used, in which the liquid blood was foamed with the addition of a blowing agent, Emustab®, and dried for drying in a stove. Physical characterization of bovine blood foam: density ( $\text{g} / \text{cm}^3$ ), percentage of expansion, air incorporation capacity and foam stability in addition to water activity analysis, determination of diffusion coefficient and protein content of the powder obtained after drying. The drying was performed based on the levels defined in a complete factorial experimental design  $2^3 + 3$  central points. The input variables were: temperature (50, 60 and 70 ° C), Emustab® concentration (3, 4.5 and 6%) and stirring time (5, 7 and 9 min). The output variables studied were: drying time (min) and final moisture content of the product. The thickness of the foam layer was kept constant at 1.0 cm. The yield of the drying process was on average 30%, and the statistical treatment of the kinetics data showed that only the temperature significantly influences the drying time and the final moisture of the product. With the kinetic data it was possible to obtain mathematical model adjustments, where the ones that presented the best fit were the Page, Two Terms Exponential and Wang and Singh for the three temperatures used, where their coefficients of determination were above 0.98 and error standard of the estimate below 0.4, with Page being the best model of the three. The material presented high values for the diffusion coefficient, of the order of  $10\text{E}-9$ , values below 0.3 for water activity and protein contents higher than 85%. The best way to produce bovine powder by the foaming method is to use the temperature at 70 ° C, Emustab® concentration of 3.0% and agitation time of 5min, obtaining a material with moisture content in around 8% and protein around 85%, in addition to the drying time being on average 190 min. The model that best fit the data and chosen for this material was Page.

**Key words:** Byproduct; modeling adjustment; diffusion coefficient

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	SANGUE BOVINO	5
2.2	SECAGEM	8
2.2.1	Mecanismos de movimento da umidade	10
2.2.2	Secagem em alimentos	11
2.2.3	Secagem em camada de espuma	12
2.3	CINÉTICA E AJUSTE DOS MODELOS DO PROCESSO DE SECAGEM	15
2.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	16
2.5	ESTADO DA ARTE	17
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>19</b>
3.1	MATÉRIA-PRIMA E APARATO EXPERIMENTAL	19
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA DE SANGUE BOVINO	20
3.2.1	Densidade da espuma	21
3.2.2	Porcentagem de expansão da espuma	22
3.2.3	Capacidade de incorporação de ar ( <i>over run</i> )	22
3.2.4	Avaliação da Estabilidade da espuma	23
3.3	METODOLOGIA EMPREGADA NA SECAGEM	24
	1ª Etapa – Coleta e armazenamento do sangue bovino	24
	2ª Etapa – Preparo da espuma e camada de espuma	25
	3ª Etapa – Secagem da espuma de sangue bovino em estufa	26
3.3.1	Ensaio de secagem convectiva	26
3.3.2	Cinética e ajuste da modelagem dos dados de secagem	28

3.3.3	Determinação da atividade de água .....	29
3.3.4	Determinação de proteínas .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA DO SANGUE BOVINO.....	30
4.1.1	Densidade da Espuma.....	31
4.1.2	Porcentagem de Expansão da Espuma .....	34
4.1.3	Capacidade de Incorporação de Ar .....	35
4.1.4	Teste de Estabilidade em Estufa.....	38
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SECAGEM DO SANGUE BOVINO .....	40
4.2.1	Umidade final em base seca .....	41
4.2.2	Tempo de secagem .....	44
4.3	CINÉTICA E AJUSTE DE MODELOS DOS DADOS DA SECAGEM .....	47
4.4	DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA .....	56
4.5	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	57
5	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS .....	61
	APÊNDICE A – Dados da ANOVA realizada para a variável: Umidade final em base seca.	66
	APÊNDICE B – Dados da ANOVA realizada para a variável: Tempo de secagem. ....	66
	ANEXO A – Artigo 294 do RIISPOA, decreto de lei nº 3.748, do dia 12 de Julho de 1993..	67

## 1 INTRODUÇÃO

O sangue bovino é considerado um subproduto com aproveitamento industrial, embora apresente-se como um resíduo que é prejudicial ao meio ambiente se descartado erroneamente. Em 2016, o IBGE contabilizou o abate de 7.409,586 cabeças de gado, em abatedouros que possuem inspeção e fiscalização da vigilância sanitária, gerando um grande volume de sangue, em torno de 12 L de sangue por animal adulto.

Araújo e Costa (2014) estudando o efeito ambiental causado pelo sangue proveniente de abatedouros públicos constataram que além de poluição fluvial, o sangue bovino é também causador de poluição dos solos, e isto ocorre principalmente devido a falta de fiscalização dos abatedouros e o abate em locais inadequados e ilegais.

Entretanto, o sangue bovino é também considerado um subproduto do abate do boi, sendo reaproveitado na fabricação da farinha de sangue e algumas vezes misturado com restos de ossos e carcaças para processamento de farinhas mistas. Nogueira (1992) relatou que o sangue é rico em proteínas (17% em média) e em ferro, principalmente o ferro heme que é dito de alta assimilação.

Para Auricchio et al. (2010) conservar o sangue líquido por refrigeração é muito caro, pois, além do grande consumo de energia, os custos para transporte e estocagem do material líquido são maiores do que para o produto em pó. Para que o sangue não seja desperdiçado no abate do animal, uma das alternativas é processá-lo através da secagem visando o aproveitamento posterior (PADILHA, LOPES E QUADRI, 2013).

A secagem possui como característica básica os processos de transferência de calor e massa, ocorrendo de forma simultânea, geralmente o agente secante, que pode ser o ar, está em temperatura maior que o objeto da secagem, fornecendo calor para o material de modo que a água presente atinja o seu calor latente de vaporização, ocasionando mudança de fase e consequente perda de massa do material.

A secagem e desidratação de produtos alimentícios são empregadas principalmente como técnicas de preservação já que os microrganismos que provocam a decomposição dos alimentos não podem se desenvolver nem se multiplicar em um meio com uma redução significativa da quantidade de água. Além disso, muitas enzimas que causam mudanças químicas nos alimentos, não podem reagir em meios com baixa concentração de água (ROMERO et al., 1997).

A secagem tem como vantagens: facilidade na conservação do produto; proteção contra microrganismos; redução de peso do produto; economia de energia e disponibilidade do produto em qualquer época do ano.

De acordo com Butolo (2002) os principais tipos de secagem utilizados com o sangue são: secagem em tambor e por atomização, além dessas duas técnicas, a secagem de leite fixo e leite fluidizado (SOBRAL, 1987) e a de leite de jorro (MASSARO, 2002) também são utilizadas para obtenção do sangue em pó.

A secagem em camada de espuma é uma das técnicas utilizadas na obtenção de alimentos secos, e é empregada transformando o produto líquido ou semilíquido em uma espuma estável, através de agitação com ou sem incorporação de agentes espumantes, sendo a espuma submetida à secagem com ar aquecido, até o ponto desejado (RATTI e KUDRA, 2006).

O Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA), lei de nº 3.748 de 12 de julho de 1993, no seu artigo 294, define que o sangue em pó é um subproduto industrial obtido pela desidratação do sangue por meio de processos especiais, que permite quando necessário à adição de agente anticoagulante e que deve conter no mínimo 85% de proteína e no máximo 8% de umidade (ANEXO A).

A utilização da secagem em camada de espuma é uma forma de buscar um método de obtenção do sangue em pó de forma que não seja necessária a utilização de um grande aparato tecnológico. O sangue passará pelo processo de secagem em camada de espuma, a fim de se obter um produto onde as condições de trabalho tais como temperatura e tempo de secagem sejam mais brandas que em outros processos.

Em outras palavras, a secagem em camada de espuma para o sangue bovino apresenta-se como uma alternativa viável para a produção de sangue em pó.

Diante do exposto, esse trabalho de pesquisa teve os seguintes objetivos:

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Obter o sangue bovino em pó pela aplicação da secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*).

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física da espuma gerada;

- Realizar o estudo cinético de secagem do sangue bovino baseado no planejamento experimental fatorial completo  $2^3 + 3$  pontos centrais (total de 11 experimentos) e avaliar a influência das variáveis de entrada (tempo de agitação, concentração de espumante e temperatura de secagem) sobre a resposta (tempo de secagem, umidade em base seca final);
- Determinar a atividade de água, o coeficiente de difusão e a concentração de proteínas do pó obtido;
- Realizar o ajuste matemático dos dados experimentais obtidos no processo de secagem em camada de espuma.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SANGUE BOVINO

O sangue é uma solução coloidal, constituída de um alto teor de diversas proteínas, enzimas, sais, lipídeos, compostos nitrogenados de baixo peso molecular, glicose e vitaminas, mantidas em suspensão (SOBRAL, 1987). Segundo Massaro (2002) o sangue é um rejeito rico em proteínas e ferro que pode contribuir na suplementação do nível proteico e fortificação dos alimentos com ferro, auxiliando no combate à anemia ferropriva.

O sangue pode ser considerado um subproduto rico em ferro hemínico e uma excelente fonte de proteínas para o enriquecimento alimentar (NOGUEIRA, 1992). Na Tabela 2.1 está apresentada uma composição do sangue bovino.

Tabela 2.1 – Composição do sangue bovino

<b>Constituinte</b>	<b>Concentração (g/L)</b>
<b>Proteínas</b>	194,0
<b>Lipídios</b>	1,8
<b>Glicídios</b>	1,0
<b>Sais Minerais</b>	9,0

Fonte: Adaptado de Sobral (1987).

Segundo Sobral (1987), o sangue é constituído por duas frações: a plasmática e a celular. A fração celular, composta pelas hemácias, é de intensa pigmentação vermelha causada pela hemoglobina. A fração plasmática, constituída pelo plasma, é de coloração clara, transparente e também rica em proteínas. Quando o sangue coagula, elementos plasmáticos e celulares formam o coágulo e o líquido claro remanescente é o soro.

A proteína do sangue é de boa qualidade, apresentando uma composição em aminoácidos essenciais comparável com a das proteínas da carne bovina, ovo e leite. O sangue é rico em lisina, mas deficiente em isoleucina e metionina. Essa deficiência é pequena e pode ser eliminada através de conjugação com outras proteínas ricas nesses dois aminoácidos essenciais (SOBRAL, 1987).

O sangue bovino proveniente de abate de animais em abatedouros sob fiscalização é um resíduo rico em ferro hematínico, proteínas ricas em ácidos aminados essenciais, vitaminas e sais minerais, além de possuir alto coeficiente de digestibilidade. Os abatedouros

são uma das categorias dentre as indústrias de alimentos que concentram o maior potencial poluidor no processamento de carnes (PADILHA, 2006).

Estes estabelecimentos, portanto, procuram processá-lo o mais rápido possível após o abate, sendo mais usual a produção de farinha de sangue, a mistura do sangue a outros resíduos para a produção de farinha de carne e ossos, por exemplo. Muitos o utilizam na produção de adubo orgânico e outros, criminosamente, o despejam diretamente em cursos de águas naturais, provocando sérios danos ao meio ambiente (MARTINS, 1993).

A carga orgânica do sangue bruto, a sua DBO, é em média 160.000 mg/L (ARRUDA, 2004) se comparado à vinhaça cuja DBO que está em torno dos 20.000 mg/L (NICOHELLI, 2012), o sangue bovino apresenta um potencial poluidor muito maior, sendo fundamental o seu tratamento após o abate.

O Brasil é um país que possui 45% das crianças de até cinco anos de idade apresentando algum grau de anemia, especialmente anemia ferropriva, percebe-se que há uma acentuada demanda por alimentos ricos em ferro, e o sangue bovino, por sua vez, constitui-se numa fonte de ferro hematínico de baixo custo, de fácil aplicação, requerendo apenas alguns poucos cuidados especiais (PADILHA, 2006). O sangue bovino permite ser aproveitado em uma diversificada gama de subprodutos e numerosas aplicações industriais, como pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Usos e aplicações do sangue bovino.

<b>Ramo/Atividade</b>	<b>Usos/Aplicações</b>
Fertilizantes	Estabilizar o pH do solo, revestimento de sementes, componente minerais.
Rações animais	Estabilizador de vitaminas, substituto do leite, suplemento de lisina, componentes nutricionais.
Medicinal	Suturas, provas de aglutinação, imunoglobulinas; técnicas de fracionamento, fatores de coagulação, produtos de fibrina, serotonina, aditivos de plasma, entre outros.
Industrial	Indústria cerâmica, adesivos, aditivos para resina; finalizadores de curtição de couros e tecidos, coadjuvantes em inseticidas pulverizantes, substituto da clara de ovo em panificação, etc.
Alimentação humana	Estabilizante, clarificante, emulsificante, composto nutricional, corantes.

Fonte: Adaptado de Padilha (2006).

A presença do sangue em formulações, por sua vez, pode modificar significativamente a cor dos produtos, o que desestimula a utilização dele em alguns casos.

Por isso o plasma tem emprego mais amplo nas formulações de produtos cárneos, como salsichas, presuntos, patês e hambúrgueres, além do uso em sopas, panificação e confeitaria, pois possui propriedades funcionais e não altera as características organolépticas do produto final (AURICCHIO et al., 2010).

Existem duas maneiras para a coleta do sangue higienicamente: o sistema aberto e o fechado. No primeiro, que é tradicional para a coleta de sangue, o sangue é coletado mediante vasilhas especiais colocadas diretamente contra o corte do animal, evitando o seu contato com a pele, para reduzir os níveis de contaminação. Ainda assim esse tipo de coleta apresenta altos riscos de contaminação já que o sangue chega a entrar em contato com o ar, e pode até entrar em contato com pele do animal.

No sistema fechado, são utilizadas facas especiais de sangria como a faca vampiro, onde a faca é introduzida diretamente no sistema arterial, e o sangue flui através de um tubo de plástico de grau alimentício, para o recipiente devidamente higienizado, contendo ou não anticoagulante, dependendo da finalidade do sangue (SOBRAL, 1987).

O sangue coletado, devido a sua riqueza biológica, sofre facilmente deterioração química, enzimática e microbiológica. Logo, se o sangue não for destinado imediatamente ao processamento, ele deve ser submetido a um tratamento que pode ser baseado na utilização de substâncias químicas, no abaixamento da temperatura ou na remoção de água.

O sangue bovino sofre rápida coagulação logo após o corte e pode entupir redes de esgoto de abatedouro, sofre também rápida decomposição ocasionando odores, promovendo o crescimento de bactérias e atraindo insetos e roedores (SOLARTE, 2011). A coagulação do sangue é produzida fisiologicamente pela ação da protombina e trombina, na presença de íons cálcio. Porém, na fabricação de sangue em pó, para que o produto final mantenha as propriedades nutritivas e o rendimento industrial seja maior, impõe-se adição de anticoagulante antes que se produza a coagulação espontânea (PARDI, 1996).

O anticoagulante mais utilizado é o citrato de sódio, onde foi utilizado a 0,5% do volume de sangue por Sobral (1987), a uma concentração de 1% no trabalho de Padilha (2006) e a 0,2% no trabalho de Martins (1993). Segundo Martins (1993), o citrato de sódio é o agente sequestrante dos íons cálcio presentes no sangue, evitando assim a sua coagulação, como os íons cálcio são essenciais para a coagulação, a adição do anticoagulante mantém o sangue em sua fase líquida.

Grande parte do sangue oriundo de abatedouros é coagulada e desidratada em secadores rotativos para a obtenção de farinha de sangue, que pode ser comercializada como ração animal (ALFA LAVAL, 2007). O processo de coagulação e secagem em secadores

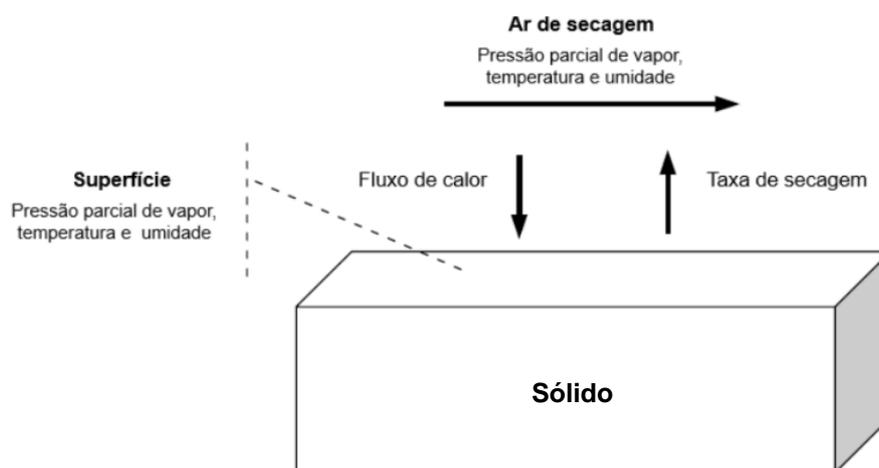
rotativos prejudica a qualidade do produto final. Por isso, não é possível utilizar-se farinha de sangue proveniente destes processos para a alimentação humana.

## 2.2 SECAGEM

A secagem é um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase onde seu objetivo maior é a redução da atividade de água do alimento a qual está intimamente relacionada ao grau de estabilidade do mesmo, do ponto de vista físico, químico e microbiológico, El-aouar et al. (2005).

Na secagem de um sólido úmido através de um gás como agente secante, ocorre o contato deste sólido com o gás de temperatura fixa maior que a temperatura do sólido, sendo assim encontrando-se em um estado de não equilíbrio térmico, ocorrendo à transferência de calor do gás para o sólido, como mostra a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Ilustração do processo de secagem.

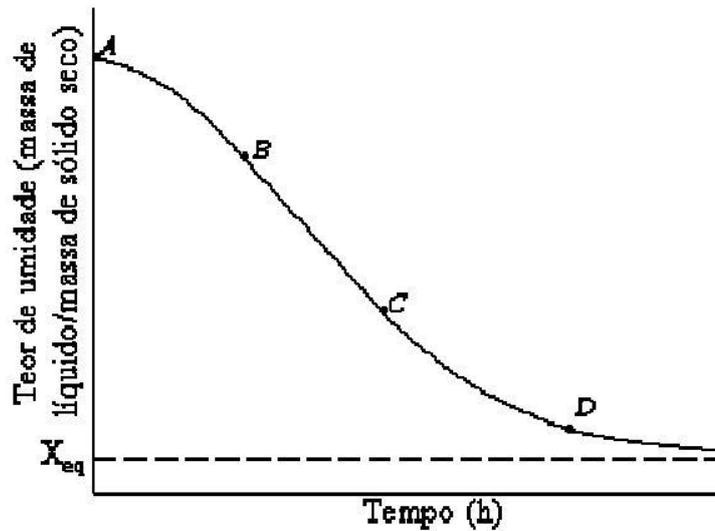


Fonte: Adaptado de FRANCO (2015).

O calor adicionado ao sólido será responsável pela vaporização da água presente no estado líquido, fazendo com que a água mude da fase, da fase líquida para a fase vapor, e consequentemente ocorra a passagem da fase de vapor para o meio.

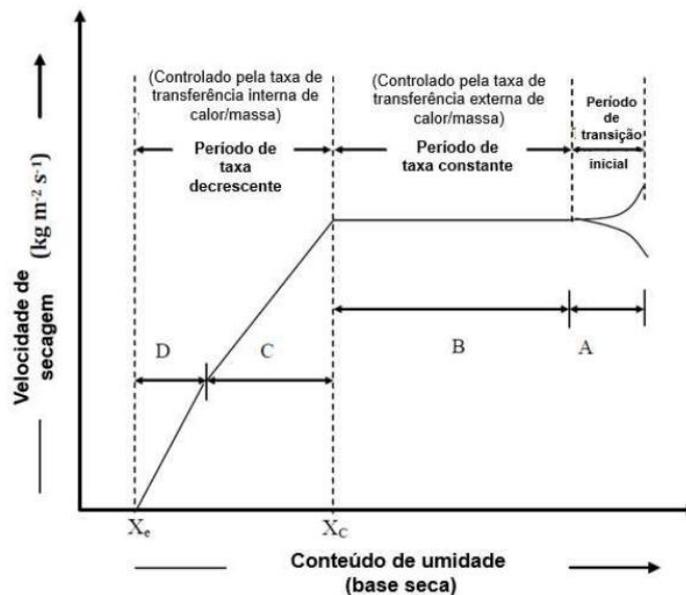
Durante a secagem é necessário remover tanto a água livre quanto a água que está retida no interior do material e se a mudança no teor de umidade varia com o tempo, é possível determinar uma curva de secagem (Figura 2.2), onde a taxa de secagem com relação a qualquer umidade pode ser determinada (Figura 2.3).

Figura 2.2 – Curva típica da cinética de secagem.



Fonte: RICHARDSON et al. (2002).

Figura 2.3 – Curva de secagem com relação a taxa de secagem.



Fonte: FRANCO (2015).

Na Figura 2.2, o intervalo BC (que corresponde ao intervalo BC, na Figura 2.3), é conhecido como período de secagem constante, onde a taxa de secagem é constante e independente do teor de umidade. Durante esse período, toda a superfície exposta do material está saturada de água. A secagem ocorre como uma evaporação de uma massa de líquido sem haver influência direta do material na taxa de secagem.

No ponto C da Figura 2.2 e no ponto C da Figura 2.3, a taxa de secagem depende do mecanismo pelo qual a umidade no interior do material é transferida para a superfície. Esses

pontos são chamados de pontos críticos, esses pontos marcam o instante em que a água líquida na superfície do material é insuficiente para manter um filme contínuo que cubra toda a área de secagem. Este período é denominado de primeiro período de secagem.

Em teores de umidade mais baixos que os pontos D na Figura 2.2 e D na Figura 2.3, toda a evaporação do líquido ocorre a partir do interior do sólido. À medida que o teor de umidade cai, a distância a ser coberta na difusão do calor e da massa aumenta até que seja atingido um teor de umidade de equilíbrio, cessando a secagem. Este período é denominado de segundo período de secagem.

A umidade presente em um determinado material é expressa em termos de quantidade de água por massa seca do material, e se um determinado sólido for exposto ao ar com uma temperatura e umidades definidas, esse sólido pode perder ou adquirir água até que seja atingido o equilíbrio, onde o equilíbrio varia de acordo com o material e as condições adotadas. É conveniente definir os parâmetros: Umidade em base seca ( $X_{bs}$ ), umidade em base úmida ( $X_{bu}$ ) e taxa de secagem ( $W$ ).

Umidade em base seca é a umidade expressa na forma de massa de água por massa de sólido seco (Equação 2.1).

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{seca}}} \quad (2.1)$$

Umidade em base úmida é a umidade expressa na forma de massa de água por massa de sólido úmido (Equação 2.2).

$$X_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \quad (2.2)$$

Taxa de secagem: relaciona as derivadas da umidade em base seca com o tempo com a área de secagem do material e a sua massa seca (Equação 2.3).

$$W = -\frac{m_{\text{seca}}}{A} \frac{dX_{bs}}{dt} \quad (2.3)$$

### 2.2.1 Mecanismos de movimento da umidade

Durante o período de taxa constante, a difusão controla a umidade vaporizada que segue para a corrente de ar. É importante entender como a umidade se comporta ao mover-se para a superfície de secagem durante o período de taxa decrescente de secagem, dois modelos

são usados para descrever a natureza física desse processo, o mecanismo de difusão e o da capilaridade.

Em um sólido relativamente homogêneo, a umidade movimenta-se, provavelmente, para a superfície por meio de difusão molecular, onde a velocidade do movimento da umidade é expressa pela segunda lei de *Fick* (Equação 2.4).

$$\frac{dX}{dt} = D_L \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

A difusão ocorre na direção “x”, de modo unidirecional, considerando ainda a geometria de placa plana. Onde X é a umidade do material em base seca em qualquer ponto e tempo, e  $D_L$  é o coeficiente de difusão do sólido para o meio. A solução da Equação (2.4) obtida por *Sherwood e Newman*, considerando que  $D_L$  seja constante, a secagem ocorrendo apenas em uma das faces da placa plana, onde as outras faces, laterais e fundo estão isoladas, e admitindo que no estado inicial a umidade esteja uniformemente distribuída na placa, tem solução na Equação 2.5.

$$\frac{X_{bs} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-D_L t \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L t \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L t \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} + \dots \right) \quad (2.5)$$

Onde  $X_{eq}$  é o teor de umidade no equilíbrio,  $X_0$  é o teor de umidade no início do período durante o qual a taxa de secagem é controlada pela difusão,  $l$  é a espessura total da placa submetida à secagem e  $t$  é o tempo de secagem.

### 2.2.2 Secagem em alimentos

A qualidade de gêneros alimentícios e o custo de sua manufatura são os fatores mais importantes para serem considerados quando se escolhe o método de preservação de alimentos. A água, sendo um dos principais componentes do alimento, tem uma influência decisiva na qualidade e durabilidade de gêneros alimentícios através do seu efeito em muitas mudanças físico-químicas e biológicas.

A desidratação de um determinado alimento pode reduzir a sua atividade microbiana, reações enzimáticas e não enzimáticas, além de reduzir o seu volume, facilitando assim o seu transporte, aumentando sua durabilidade e agregando valor ao mesmo (BOEIRA et al., 2007).

A água presente nos alimentos é comumente expressa em termos da sua atividade de água, que corresponde à relação existente entre a pressão parcial de vapor de água na superfície do alimento ( $p$ ) e a pressão parcial de vapor de água pura ( $p_0$ ) a uma dada temperatura, como mostra a Equação 2.6:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (2.6)$$

A atividade de água é um parâmetro que varia de 0 a 1, sendo valores próximos à zero para pouca ou nenhuma atividade água presente e valores próximos a um para alta atividade de água.

As moléculas de água fracamente ligadas ao soluto do alimento são mais susceptíveis a reações que degradam a qualidade do alimento, Marcinkowski (2006). A redução da atividade de água de um determinado alimento é sempre um dos objetivos dos processos de secagem, reduzindo os efeitos de degradação natural dos alimentos.

### 2.2.3 Secagem em camada de espuma

O processo de secagem em camada de espuma é uma técnica que foi desenvolvida por Morgan et al. (1959), onde em seus primeiros trabalhos patentearam o processo básico de “secagem em camada de espuma” a pressão atmosférica, indicando as etapas essenciais na obtenção de uma espuma estável a partir de alimentos fluidos e posterior secagem da espuma com ar quente (ZURITZ, 1976). Como vantagem desse método, pode-se citar a baixa temperatura empregada e o menor tempo para o fim da secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar.

Como desvantagens, além do elevado custo para grandes demandas de produção, esse método necessita da utilização de reagentes espumantes, que podem modificar características sensoriais do alimento como sabor, aroma e cor. Outra desvantagem e ponto crítico do processo é a dificuldade encontrada na formação da espuma e estabilidade da espuma durante o processo de secagem. A formação, a densidade e a estabilidade das espumas são afetadas por diversas variáveis como a natureza química do material, teor de sólidos solúveis e, principalmente, pelo tipo e concentração do agente espumante (MARQUES, 2009).

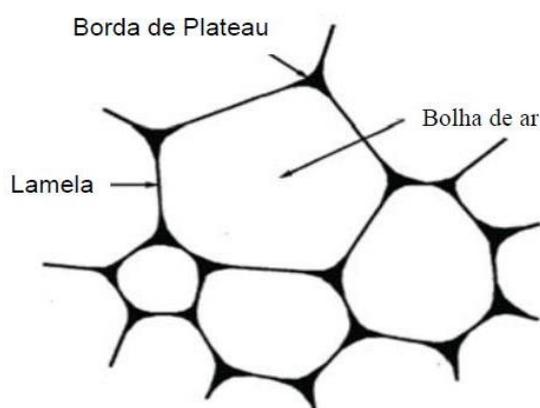
O processo além de permitir uma rápida remoção de água, promove a obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação, sendo aplicado em diversos produtos alimentícios (SILVA et al., 2008).

Nem todos os alimentos apresentam capacidade de formação de espuma, principalmente os com baixo teor de proteína em sua composição, fazendo com que se torne necessária a adição de um agente espumante ou estabilizante, que são adicionados em diferentes concentrações dependendo da sua eficiência, mensurável através da sua capacidade de formação e estabilidade da espuma (FALADE e OKOCHA, 2012).

De acordo com Soler e Veiga (2001) os emulsificantes são substâncias tensoativas que contém porções hidrofóbicas e hidrofílicas em sua molécula. Reduzem a tensão interfacial, estabilizando a mistura e facilitando a formação de emulsão (pequenas gotas em suspensão) e espuma (ar em suspensão). Dentre os emulsificantes mais usados na indústria de alimentos, o Emustab® tem se destacado e é um aditivo composto de monoglicérides, monoestearato de sorbitana e polisorbato 60 (MARQUES, 2009).

Segundo Franco (2015) as espumas podem ser consideradas um sistema bifásico onde uma fase gasosa está dispersa numa fase líquida contínua e é descrita termodinamicamente como um sistema instável (LAU e DICKINSON, 2004). Filmes líquidos adjacentes se aglomeram formando o que é chamado de “Borda de Plateau” (Figura 2.4), onde a fase contínua é interconectada através de uma rede de bordas de *plateau* e de uma camada fina que é conhecida como “Lamela” (WANG e NARSIMHAN, 2004).

Figura 2.4 – Estrutura da espuma.



Fonte: MUTHUKUMARAN et al. (2008).

A propriedade física mais importante de uma emulsão é sua estabilidade e esta pode ser relacionada a três fenômenos: sedimentação, floculação e quebra ou rompimento da

emulsão por causa da coalescência das gotículas dispersas. Os fatores que favorecem a estabilidade de emulsão são tensão interfacial baixa, filme interfacial mecanicamente forte, repulsão das duplas camadas elétricas, volume relativamente pequeno da fase dispersa, gotículas pequenas e viscosidade Newtoniana elevada. Para aumentar a estabilidade é necessário o uso de um agente espumante (PINTO, 2009).

A espuma aumenta a eficiência de secagem porque aumenta a área superficial e incrementa a transferência de calor e massa. Além disso, a capilaridade através dos poros da espuma facilita a perda da umidade. Isso faz com que a secagem de uma camada de espuma seja aproximadamente três vezes mais rápida do que a secagem de uma camada similar de líquido (FRANCIS, 2000).

Um material líquido possui maior densidade que o mesmo material na forma de espuma, pois quando o líquido é transformado em espuma, há um aumento do volume do material, diminuindo a densidade, aumentando a área superficial exposta ao ar, assim acelerando o processo de evaporação da água, sendo esse fator responsável pelo reduzido tempo de secagem (BARRETO, 2011).

Esse método consiste de três etapas básicas, de acordo com Roncheti (2014):

- Mudança do alimento líquido ou pastoso em uma espuma por meio de equipamentos geradores de espuma, como uma bateadeira, por exemplo, e adição de agentes espumantes;
- Espalhamento da espuma sobre uma superfície, perfurada ou não, em camada com espessura em torno de 2 a 10 mm;
- Processo de desidratação, geralmente por corrente de ar quente. Durante a secagem, a espuma mantém seu volume resultando em um produto poroso e quebradiço que é facilmente transformado em pó. Em alguns casos ocorre a diminuição do volume poroso.

A transferência de umidade durante a secagem acontece em dois passos sucessivos.

Primeiro, do interior para a superfície (transferência interna de umidade). E, segundo, evaporação da superfície para o ar (transferência externa de umidade). Se a taxa de transferência interna de umidade é igual ou maior do que a taxa de transferência externa de umidade, o processo ocorre com uma taxa constante de secagem, chamada de Período de Taxa Constante (PTC). Se a taxa de transferência interna de umidade é menor do que a taxa de transferência externa de umidade, o processo ocorre com uma taxa decrescente de secagem chamado de Período de Taxa Decrescente (PTD). (DEMIREL e TURHAN, 2003).

Dependendo das propriedades do material e das características do ar de secagem, a secagem de produtos agrícolas é caracterizada por apresentar PTC e ou PTD. Em geral, produtos intactos exibem apenas PTD e produtos cuja integridade celular tenha sido quebrada podem exibir PTC antes do PTD. A secagem de espumas envolve alimentos líquidos como sucos, extratos e polpas preparadas (purês) em que não há sequer tecido, mas apenas uma pequena proporção de células dispersas na fase líquida. Portanto, considerando-se apenas as propriedades do material, espumas alimentícias normalmente apresentam PTC antes do PTD (MARQUES, 2009).

### 2.3 CINÉTICA E AJUSTE DOS MODELOS DO PROCESSO DE SECAGEM

Segundo Silva (2013) quando um material é submetido ao processo de secagem ele tende a perder umidade, como a mudança de fase da água no interior do material ocorre em condições de temperatura e umidade relativas do ar constantes. Quando um material atinge a condição de equilíbrio com o meio circundante, define-se que o teor de umidade final seja teor de umidade de equilíbrio (FRANCO, 2015).

As curvas de secagem se referem ao comportamento do material que foi seco, e são obtidas pelos dados de teor de umidade de um produto submetido à secagem, em que a massa da amostra é registrada continuamente em função do tempo (PARK et al., 2007).

Afzal e Abe (2000) citam que a modelagem matemática de processos de secagem baseia-se em três categorias principais: modelos teóricos que utilizam a equação da difusão ou relacionam equações simultâneas de transferência de calor e massa; modelos empíricos que são facilmente aplicados à simulação de processos de secagem, dependendo apenas dos dados experimentais; e modelos semi-empíricos ou semi-teóricos que relacionam equações teóricas com ajustes empíricos.

Segundo Franco (2015) os modelos matemáticos mais utilizados são para o processo de secagem em camada delgada, já que possuem capacidade de descrever o fenômeno de secagem de uma maneira unificada, independente do mecanismo de controle.

Segundo Mcminn (2006) os modelos são divididos em Teóricos e semi-teóricos (Page, Logarítmico, Dois termos, Dois termos exponencial, Aproximação por difusão, Handerson e Pabis, Midili, entre outros modelos) e empíricos (Wang e Singh). Na Tabela 2.3 são mostrados os modelos matemáticos citados para prever o processo de secagem.

Tabela 2.3 – Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem.

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>	<b>Referências</b>
<b>Dois termos</b>	$RU = a \text{Exp}(-kt) + b \text{Exp}(-nt)$	HENDERSON, 1974
<b>Wang e Singh</b>	$RU = 1 + (at) + (bt^2)$	WANG & SINGH, 1978
<b>Dois termos exponencial</b>	$RU = a \text{Exp}(-kt) + (1-a) \text{Exp}(-kat)$	SHARAF-ELDEN et al, 1980
<b>Page</b>	$RU = \text{Exp}(-kt^n)$	ZHANG & LITCHFIELD, 1991
<b>Newton</b>	$RU = \text{Exp}(-kt)$	LIU & BAKKER-ARKEMA, 1997
<b>Logarítmico</b>	$RU = a \text{Exp}(-kt) + c$	YALDIZ et al., 2001
<b>Aproximação por difusão</b>	$RU = a \text{Exp}(-kt) + (1-a) \text{Exp}(-kbt)$	YALDIZ & ERTEKIN, 2001
<b>Henderson e Pabis</b>	$RU = a \text{Exp}(-kt)$	PARK et al., 2002
<b>Midilli modificado</b>	$RU = \text{Exp}(-kt^c) + (bt)$	MIDILLI et al., 2002

Fonte: Adaptado de FRANCO (2015).

Onde RU é a razão de umidade. k é constante de secagem por minuto; a, b, c, n são os coeficientes dos modelos e t é o tempo de secagem, em minutos. Os parâmetros das equações são determinados através do método de Gauss-Newton para uma regressão não-linear de dois parâmetros.

## 2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O alto desenvolvimento tecnológico nas indústrias e a grande competitividade no mercado tornam, a cada momento, mais difícil pensar em desenvolvimento de produtos e processos sem a utilização de planejamentos experimentais.

Vários estudos da literatura mostram a grande vantagem do uso da metodologia do planejamento fatorial em relação ao uso da investigação de uma variável por vez. Esta metodologia fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro, sendo que há vantagens incomparáveis quanto ao número de ensaios e qualidade na informação. São inúmeros os exemplos de aplicação da metodologia de planejamento experimental e análise de superfície de resposta em processos de secagem (RODRIGUS E IEMMA, 2005).

O planejamento experimental além de ser uma ferramenta que auxilia na obtenção de resultados e análises estatísticas, também direciona o pesquisador durante a execução dos procedimentos experimentais.

## 2.5 ESTADO DA ARTE

Sobral (1987) estudou a secagem do sangue bovino em secadores de leito fixo e fluidizado, para incorporação da proteína de soja, apresentando um produto final com valores de 64 a 72% de proteínas.

Nogueira (1992) estudou a utilização do sangue bovino como aditivo alimentar para controle de anemia ferropriva em pré-escolares. De acordo com o autor antes da ingestão dos alimentos fortificados, cerca de 75% da população estudada apresentavam anemia e durante o período de três meses de ingestão dos alimentos houve uma melhoria significativa em 100% das crianças estudadas, apresentando uma melhora no nível de hemoglobina.

Martins (1993) utilizou o sangue bovino juntamente com quirera de arroz moído para produção de uma farinha de sangue, a qual foi propícia ao cultivo artificial do peixe tambaqui (*Colossoma macropomum*).

Duarte (1997) utilizando o plasma sanguíneo separado e submetido ao *spray dryer*, obteve um concentrado proteico de plasma (CPP) para posterior utilização em alimentação humana, com um aproveitamento de 81,05% de proteína e uma digestibilidade de 95,03% para o pó obtido.

Simões (1998) utilizou o sangue bovino obtido através da secagem por atomização para formulação de suplemento nutricional para mulheres de famílias carentes no estado de São Paulo, onde observou que após os testes as envolvidas apresentaram melhora significativa com relação às quantidades de hemoglobina.

Massaro e Pinto (2002) estudaram a incorporação do sangue bovino em farelo de arroz desengordurado pelletizado visando o melhoramento nutricional do produto em termos de proteínas, elevando o seu valor de cerca de 15% para 21% em média.

Padilha (2006) estudou as isotermas de adsorção de um suplemento alimentício rico em ferro hematínico onde foi utilizado o sangue bovino em pó obtido por atomização.

Moreira (2013) estudou a secagem do sangue bovino por atomização, a fim de produzir um sistema de secagem para o sangue bovino proveniente de abatedouros, este sistema apresentou um rendimento de 77% na produção do sangue em pó.

A secagem em camada de espuma é uma técnica largamente utilizada, que apresenta vantagens como o baixo custo e o baixo tempo de produção. A secagem de sangue bovino em camada de espuma é um processo inédito, tornando difícil a comparação dos resultados com outros trabalhos da mesma área.

O estudo acerca da secagem em camada de espuma vem sendo largamente utilizado para diferentes tipos de materiais, como é o caso de Guimarães et al. (2017), que estudaram a cinética a secagem da polpa de manga utilizando Emustab® como emulsificante e na faixa de temperatura de 50 a 70°C. Baptestini et al (2015) empregaram a graviola ao processo de secagem onde o emulsificante utilizado foi a albumina e uma faixa maior de temperatura, de 40 a 80°C.

Galdino et al (2016) utilizaram a polpa integral de atemoia na secagem em camada de espuma com a adição de Emustab® como emulsificante e faixa de temperatura de 60 a 80°C. Gurgel et al (2014) também estudaram a cinética de secagem da graviola com a adição de Emustab® como a gente emulsificante, em faixa de temperatura de 50 a 70°C.

Romão (2016) estudou a secagem em camada de espuma da gema de ovo de capoeira tendo como variáveis de entrada o tempo de agitação, temperatura de secagem e concentração de espumante, analisando as propriedades físicas da espuma e teor de umidade e proteína para o pó, neste estudo foi constatado que nos níveis máximos do planejamento fatorial utilizado a secagem foi mais rápida e apresentou os melhores resultados para as caracterizações.

### 3 METODOLOGIA

Os experimentos da secagem do sangue bovino em camada de espuma foram desenvolvidos no Laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

#### 3.1 MATÉRIA-PRIMA E APARATO EXPERIMENTAL

O sangue bovino foi cedido pelo abatedouro HONORATO & ARAÚJO, situado na zona rural da cidade de Santa Rita, Paraíba. Foram utilizados o anticoagulante Citrato de sódio Tribásico Anidro e o emulsificante/estabilizante Emustab®, ambos adquiridos no comércio local.

A balança semi-analítica da marca Shimadzu com precisão de 0,01 g, foi utilizada em todas as etapas para medições das massas utilizadas.

Para a coleta das amostras de sangue, foram utilizadas garrafas Pet transparentes, juntamente com funil plástico. As amostras foram transportadas em uma caixa térmica, sem gelo até o laboratório onde foram armazenadas em um refrigerador Consul Frost-Free com temperatura em torno de 10 °C durante o tempo dos experimentos, cerca de duas semanas.

A espuma foi preparada em uma batedeira planetária da marca ARNO, com a homogeneização completa da mistura. Para a formação da camada de espuma foi utilizada uma bandeja de alumínio (36,8 x 26,4 cm) com espessura fixa de 1,0 cm.

Para a secagem foi utilizada uma estufa com circulação e renovação de ar (SOLAB SL-102/221), a estufa possui bandejas no seu interior que serviram como suporte para a bandeja de alumínio com a espuma. A atividade de água foi determinada no aparelho LabMaster-Aw da marca Novasina.

O teor de proteínas foi determinado pelo método Kjeldahl e foram utilizados todos os materiais necessários para a execução do método.

Além dos materiais citados, foram utilizados béqueres de vidro de 100, 150, e 400 mL, espátulas de alumínio e provetas de 50 mL.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA DE SANGUE BOVINO

Foram feitas quatro caracterizações físicas da espuma do sangue bovino, sendo elas: densidade; porcentagem de expansão; capacidade de incorporação de ar (*over run*) e a estabilidade em estufa.

A caracterização teve como base as mesmas variáveis independentes da secagem em camada de espuma (temperatura (°C), concentração de Emustab® (%) e tempo de agitação (min)), sendo os testes realizados antes do processo de secagem.

A determinação da densidade, porcentagem de expansão da espuma e capacidade de incorporação de ar (*over run*) ocorreu à temperatura ambiente ( $\pm 25$  °C) e umidade relativa em torno de 70%. O teste de estabilidade de estufa foi realizado levando em consideração a temperatura de secagem. Na Tabela 3.1 são apresentados os valores utilizados das variáveis independentes, sendo que para o tratamento estatístico dos resultados sobre densidade, capacidade de incorporação e porcentagem de expansão a influência da variável temperatura foi desconsiderada.

Tabela 3.1 – Valores codificados e reais das variáveis independentes para a caracterização física da espuma.

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
<b>Concentração de estabilizante (%)</b>	2,0	4,0	6,0
<b>Temperatura da estufa (°C)</b>	50,0	60,0	70,0
<b>Tempo de agitação (min)</b>	3,0	5,0	7,0

Os valores das variáveis utilizadas nos testes da caracterização possuem como base o trabalho de Santos (2016), onde foram feitos experimentos com a secagem do sangue bovino a fim de se determinar os níveis de trabalho para estas três variáveis estudadas.

Para a caracterização física da espuma foram realizados 11 experimentos utilizando os valores das variáveis apresentados na Tabela 3.1. A realização dos experimentos teve como base os moldes de um planejamento experimental fatorial completo, onde oito experimentos foram gerados com as combinações das variáveis em seus níveis máximos e mínimos e mais três experimentos foram acrescidos com os valores das variáveis em seu nível médio, onde foram nove experimentos distintos de um total de onze.

Na Tabela 3.2 são apresentadas as combinações dos 11 experimentos realizados para a caracterização física da espuma.

Tabela 3.2 – Matriz do planejamento experimental fatorial completo  $2^3 + 3$  pontos centrais utilizada para os testes de caracterização física da espuma do sangue bovino.

Experimentos	C (%)	T (°C)	t <sub>ag</sub> (min)
1	-1 (2,0)	-1 (50,0)	-1 (3)
2	+1 (6,0)	-1 (50,0)	-1 (3)
3	-1 (2,0)	+1 (70,0)	-1 (3)
4	+1 (6,0)	+1 (70,0)	-1 (3)
5	-1 (2,0)	-1 (50,0)	+1 (7)
6	+1 (6,0)	-1 (50,0)	+1 (7)
7	-1 (2,0)	+1 (70,0)	+1 (7)
8	+1 (6,0)	+1 (70,0)	+1 (7)
9	0 (4,0)	0 (60)	0 (5)
10	0 (4,0)	0 (60)	0 (5)
11	0 (4,0)	0 (60)	0 (5)

C - Concentração (%); T – Temperatura (°C); t<sub>ag</sub> – tempo de agitação (min).

### 3.2.1 Densidade da espuma

A densidade foi determinada utilizando proveta de 50 mL previamente calibrada com água destilada, onde a mesma foi preenchida com a espuma do sangue até o volume de 50 mL (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Avaliação da densidade da espuma do sangue.



A proveta foi pesada e a densidade da espuma foi determinada utilizando a Equação 3.1.

$$\rho_{\text{espuma}} = \frac{m_{\text{espuma}}}{V_{\text{proveta}}} \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_{\text{espuma}}$  = densidade da espuma (g/cm<sup>3</sup>);

$m_{\text{espuma}}$  = massa da amostra (g) e

$V_{\text{proveta}}$  = volume da proveta (cm<sup>3</sup>).

### 3.2.2 Porcentagem de expansão da espuma

A partir dos resultados de densidade obtidos, os valores em percentual de expansão da espuma puderam ser determinados através da Equação 3.2.

$$\% \text{expansão} = \frac{1/\rho_{\text{espuma}} - 1/\rho_{\text{sangue}}}{1/\rho_{\text{sangue}}} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde,

$\rho_{\text{sangue}}$  = densidade do sangue in natura (g/cm<sup>3</sup>).

A densidade do sangue in natura foi determinada pesando uma proveta preenchida com 50 mL de sangue bovino e verificando sua massa, dividindo a massa pelo volume.

### 3.2.3 Capacidade de incorporação de ar (*over run*)

A capacidade de incorporação de ar está diretamente ligada ao volume de ar introduzido em uma solução, podendo ser determinada pelo volume da espuma formada. Para a determinação do *over run* foi avaliado o volume do sangue em um béquer antes e após agitação na batadeira planetária.

O calculo da variável foi feito de acordo com a Equação 3.3.

$$\% CI = \frac{V_{\text{espuma}} - V_{\text{líquido}}}{V_{\text{líquido}}} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde,

%CI = Capacidade de incorporação de ar (%)

$V_{\text{espuma}}$  = volume da espuma formada após agitação (mL);

$V_{\text{líquido}}$  = volume do líquido colocado no béquer antes da agitação (mL).

### 3.2.4 Avaliação da Estabilidade da espuma

A estabilidade da espuma foi avaliada segundo método citado por Karin e Chuwai (1999), onde 15 a 20 g de espuma foram depositados em um funil com filtro de nylon em proveta graduada (Figura 3.2) mantida nas temperaturas de secagem (50, 60 e 70°C) em estufa com circulação de ar por 90 minutos. Mediu-se o volume drenado em intervalos regulares, à medida que a espuma é desfeita.

A metodologia baseia-se no princípio de que a estabilidade da espuma é inversamente proporcional ao volume do líquido drenado na proveta.

Figura 3.2 – Teste de estabilidade da espuma em estufa.

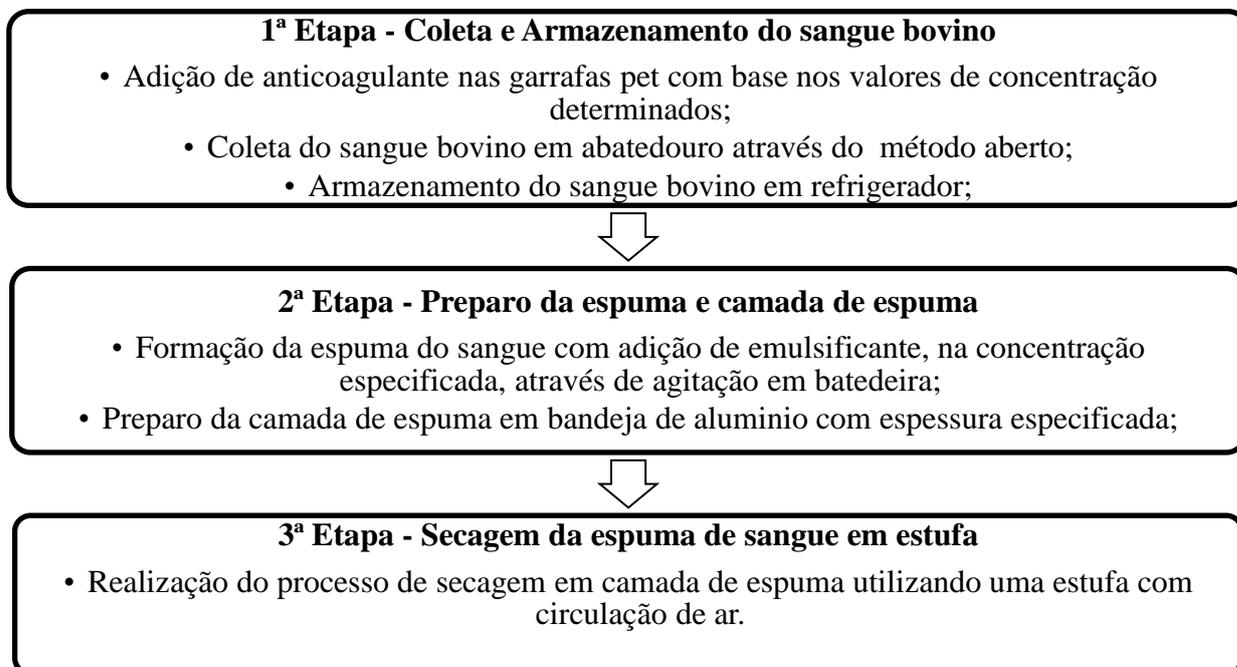


Os resultados das análises de densidade da espuma, porcentagem de expansão da espuma e capacidade de incorporação de ar passaram por uma análise estatística, foi feita a análise das variáveis que influenciam nas respostas e gerados gráficos de Pareto, e foi feita pelo software Statistica® 7.0, onde apenas as variáveis: concentração de Emustab® e tempo de agitação tiveram seus efeitos contabilizados.

### 3.3 METODOLOGIA EMPREGADA NA SECAGEM

A metodologia empregada no processo está apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Fluxograma do processo para obtenção do sangue em pó.



A metodologia utilizada no trabalho gerou uma patente de número **BR201710007416-1**, intitulada de “OBTENÇÃO DO SANGUE BOVINO EM PÓ ATRAVÉS DO PROCESSO DE SECAGEM EM CAMADA DE ESPUMA, UTILIZANDO EMULSIFICANTE/ESTABILIZANTE COMO AGENTE ESPUMANTE”.

A metodologia foi utilizada previamente por Santos (2016) e é descrita nas seções a seguir.

#### 1ª Etapa – Coleta e armazenamento do sangue bovino

A coleta foi feita de forma direta sendo feita após a sangria do animal, onde um funil foi colocado na garrafa de coleta e o sangue escoou diretamente da veia do animal para a garrafa contendo o anticoagulante, sendo a garrafa homogeneizada em seguida para garantir uma boa ação do anticoagulante. A quantidade de citrato de sódio utilizada foi de 1%.

Após a coleta, as garrafas com o sangue (Figura 3.4) foram acondicionadas em uma caixa térmica e transferidas para o laboratório, onde foram armazenadas em um refrigerador

para posterior uso. As garrafas ficaram armazenadas por cerca de uma semana enquanto o sangue era utilizado.

Figura 3.4 – Garrafas com o sangue bovino após a coleta.



## 2ª Etapa – Preparo da espuma e camada de espuma

Para a formação da espuma (Figura 3.5), foi colocado em um béquer 100g de sangue líquido (sem a presença de coágulos) e adicionado o Emustab®, com concentrações definidas a partir do planejamento experimental fatorial completo; essa mistura foi levada para a batedeira e agitada de maneira constante, com tempo de agitação também definido a partir do planejamento fatorial. A velocidade de agitação permaneceu constante para a realização de todos os experimentos, e para a batedeira utilizada foi a velocidade 7 de um máximo de 8.

Figura 3.5 – Espuma de sangue formado, de acordo com a metodologia acima.



Em uma bandeja de alumínio foi colocada a espuma de sangue de modo uniforme até alcançar a espessura de 1,0 cm (Figura 3.6).

Figura 3.7 – Espuma de sangue na bandeja de alumínio.



### 3ª Etapa – Secagem da espuma de sangue bovino em estufa

Após a bandeja ser preparada com a camada de espuma do sangue, a mesma foi colocada na estufa com circulação de ar. As condições de secagem (temperatura, concentração de Emustab® e tempo de agitação) foram definidas através do planejamento experimental fatorial completo. Em tempos pré-definidos a bandeja foi pesada, sua massa anotada e a mesma recolocada na estufa; esse procedimento foi realizado até não haver mais variação de massa.

Ao final da secagem foi possível a obtenção do sangue bovino em pó, com variações na sua umidade de acordo com as condições de secagem utilizadas para cada experimento.

#### 3.3.1 Ensaios de secagem convectiva

Os experimentos foram feitos com base em um planejamento experimental fatorial completo  $2^3$  acrescido de três repetições no ponto central. Nas Tabelas 3.3 e 3.4 são mostradas as variáveis de entrada e seus respectivos níveis e a matriz do planejamento adotado, respectivamente.

Tabela 3.3 – Valores codificados e reais das variáveis independentes.

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
<b>Concentração de emulsificante (%)</b>	3,0	4,5	6,0
<b>Temperatura da estufa (°C)</b>	50,0	60,0	70,0
<b>Tempo de agitação (min)</b>	5,0	7,0	9,0

Os valores de concentração de Emustab® de 3,0 a 6,0% foram utilizados com base nos testes realizados por Santos (2016) e com base nos testes realizados durante a caracterização da espuma do sangue bovino.

Os valores do tempo de agitação possuem como base os trabalhos realizados por Romão (2016) e Melo et al. (2013) que aplicaram o método de secagem a gema do ovo da galinha de capoeira e ao fruto do mandacaru respectivamente.

A faixa de temperatura escolhida possui como base os trabalhos realizados por Silva (2008), Melo et al. (2013), Fernandes et al (2014) e Franco (2015), onde os autores utilizaram temperaturas na faixa de 50 a 80 °C para os processos de secagem em camada de espuma com diferentes tipos de produtos. A faixa de temperatura escolhida para trabalho foi de 50 a 70 °C.

A espessura da camada de espuma foi mantida em 1,0 cm, visto que a bandeja possui uma altura de 1,0 cm e nivelar a espessura da espuma em uma altura menor traria uma não uniformidade na formação da camada, sendo mantida constante.

Como a secagem do sangue bovino em camada de espuma é um trabalho inédito as determinações dos valores dos parâmetros a serem trabalhados além de terem como base outros trabalhos na área de secagem em camada de espuma foram levadas em consideração principalmente os resultados obtidos por Santos (2016).

Tabela 3.4 – Matriz do planejamento experimental fatorial completo  $2^3 + 3$  pontos centrais para o processo de secagem.

<b>Experimentos</b>	<b>C (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>t<sub>ag</sub> (min)</b>
1	-1 (3,0)	-1 (50,0)	-1 (5)
2	+1 (6,0)	-1 (50,0)	-1 (5)
3	-1 (3,0)	+1 (70,0)	-1 (5)
4	+1 (6,0)	+1 (70,0)	-1 (5)
5	-1 (3,0)	-1 (50,0)	+1 (9)
6	+1 (6,0)	-1 (50,0)	+1 (9)
7	-1 (3,0)	+1 (70,0)	+1 (9)
8	+1 (6,0)	+1 (70,0)	+1 (9)
9	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)
10	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)
11	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)

C - Concentração (%); T – Temperatura (°C); t<sub>ag</sub> – tempo de agitação (min).

Os experimentos não foram realizados na mesma ordem em que se encontram na Tabela 3.3, obedecendo à aleatoriedade do planejamento (Ordem real dos ensaios: 3, 9, 8, 6, 7, 11, 5, 4, 10, 2 e 1).

As medições de perda de massa foram realizadas em intervalos de tempo determinados até que fosse observada a massa constante da bandeja. Após a secagem o pó obtido foi armazenado em recipientes plásticos transparentes para posterior estudo.

### 3.3.2 Cinética e ajuste da modelagem dos dados de secagem

Com os dados obtidos durante o acompanhamento da perda de umidade durante o processo de secagem da espuma nas diferentes condições experimentais foi possível obter-se a razão de umidade adimensional (RU) utilizada nos modelos cinéticos, determinada pela Equação 3.4.

$$RU = \frac{X_{bs}}{X_{bs0}} \quad (3.4)$$

A partir dos dados experimentais e dos modelos matemáticos mostrados pela Tabela 2.3, foram feitas análises de regressão não-linear utilizando o software Statistica® 7.0 da Statsoft. Os ajustes dos modelos foram testados por meio da comparação dos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão da estimativa (S), onde S é determinado pela Equação 3.5.

$$S = \sqrt{M_R} \quad (3.5)$$

Onde:

$M_R$  = Média quadrática residual;

Os valores de S representam o ajuste do modelo aos pontos, ou seja, quanto menor este valor melhor ajustado estará o modelo, onde os valores diferem dos obtidos experimentalmente dos preditos pelo modelo.

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por meio do ajuste matemático da difusão líquida através da segunda Lei de *Fick* para uma placa plana (Equação 2.5).

Para uso da Equação 2.5, algumas considerações foram feitas, são elas:

- A difusividade  $D_L$  é constante ao longo do tempo;
- No início a umidade do produto é uniformemente distribuída;
- O Encolhimento do produto durante a secagem é desprezível;
- A remoção de água é unidirecional;
- A camada de espuma forma uma placa plana.

A estimativa do coeficiente de difusão é feita através de regressão não-linear, utilizando o método de Gauss-Newton.

### 3.3.3 Determinação da atividade de água

A atividade de água foi determinada através de leitura direta da amostra no Novasina, e foi utilizada a temperatura de 30 °C para as leituras. Os dados foram coletados logo após a secagem ser concluída, sendo necessário apenas reduzir a temperatura da amostra a uma temperatura ambiente.

### 3.3.4 Determinação de proteínas

Segundo Massaro (2002) uma das formas mais tradicionais de recuperação de proteínas é através da secagem em condições controladas para não causar a desnaturação das proteínas.

A determinação foi feita de acordo com o método de Kjeldhal, utilizando o fator de correção de 6,25, sendo este método caracterizado por três etapas: digestão, destilação e titulação de acordo com método AOAC (2002).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pó do sangue bovino obtido através da secagem em camada de espuma está apresentado na Figura 4.1

Figura 4.1 – Sangue bovino em pó.



De maneira geral para todos os experimentos, o sangue bovino em pó apresenta boa fluidez e cor vermelho escuro (após a produção). A cor difere de tonalidade quando comparado com o sangue em pó obtido por MOREIRA (2013), que é um pó de cor vermelha, obtido pela secagem por atomização.

A produção de sangue bovino por secagem em camada de espuma possui um rendimento médio de 30% por produção. A cada 100 g de sangue líquido são produzidos em média 30 g de sangue bovino em pó.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESPUMA DO SANGUE BOVINO

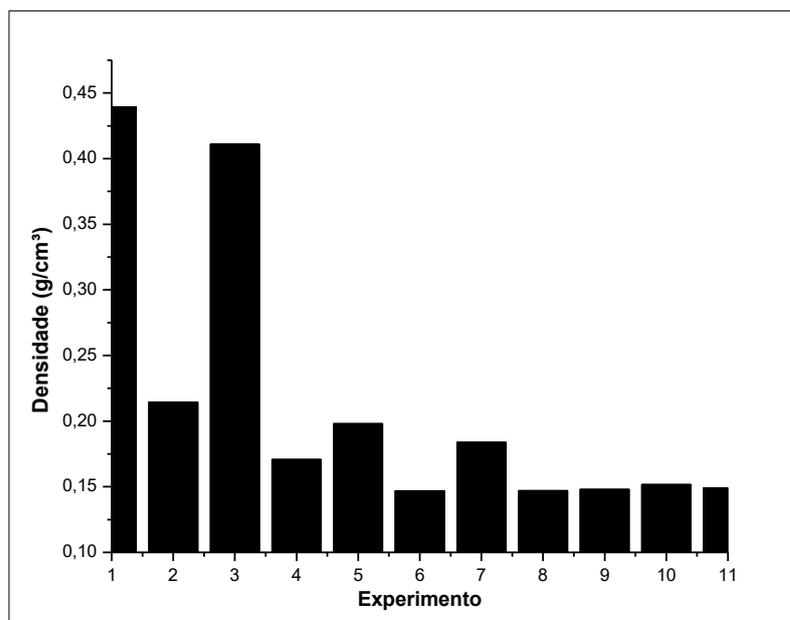
A partir dos dados experimentais foram propostos modelos para as propriedades físicas da espuma e os resultados analisados com base nos valores do coeficiente de determinação e o erro padrão da estimativa.

As variáveis estudadas na caracterização possuem valores descritos na Tabela 3.1 e os testes foram realizados com base nas combinações entre estas variáveis presentes na Tabela 3.2, sendo seus resultados expressos em formas de gráficos e diagramas nas próximas seções.

#### 4.1.1 Densidade da Espuma

Através do diagrama apresentado na Figura 4.2, é possível a observação dos valores das densidades médias ( $\text{g/cm}^3$ ), o coeficiente de determinação e o erro padrão.

Figura 4.2 – Densidade da espuma do sangue bovino em  $\text{g/cm}^3$ .



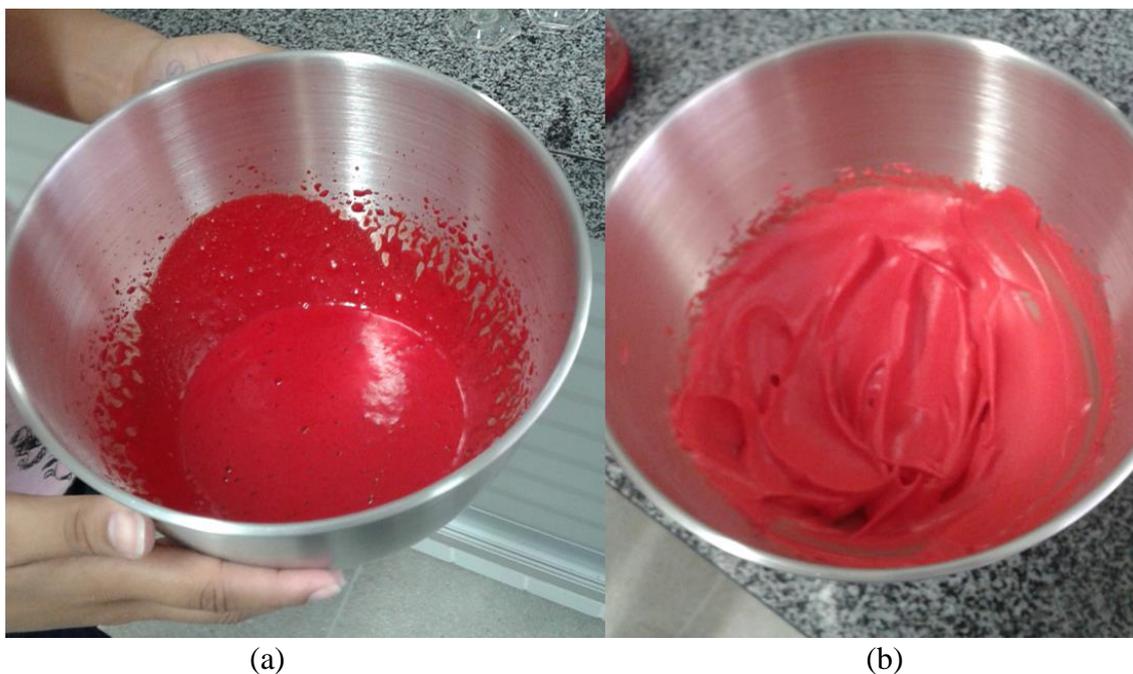
Observam-se na Figura 4.2 que os experimentos de número 1 e 3 apresentaram os maiores valores de densidade, valores bem maiores do que os outros experimentos, e isto é devido às variáveis utilizadas em ambos, a menor concentração de Emustab® e o menor tempo de agitação, terem sido insuficientes para a formação de uma espuma estável.

Utilizar 2% em concentração de Emustab® juntamente com o tempo de agitação de 3,0 min é a pior combinação entre estas variáveis, haja vista que é formada uma espuma muito instável que coalesce rápido em temperatura ambiente, gerando uma quantidade de sangue líquido visível no recipiente onde foi feita à agitação.

De acordo com os valores obtidos determinou-se que a faixa ideal experimental para a densidade da espuma do sangue bovino, situa-se na faixa de 0,1437 e 0,1919  $\text{g/cm}^3$ , ou seja, a espuma que apresentar densidade dentro dessa faixa tende a apresentar uma boa estabilidade, sendo viável para o processo de secagem em camada de espuma.

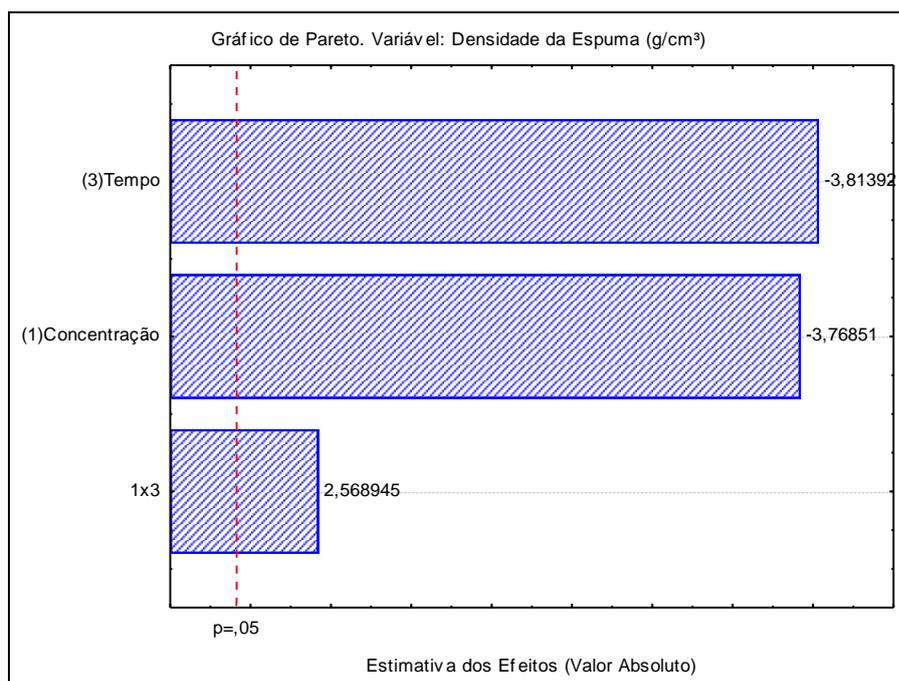
Na Figura 4.3 pode-se observar a diferença entre as espumas formadas para o maior e menor valor de densidade obtido, onde o maior valor foi obtido para o experimento com menores níveis de concentração (2% em massa) e de tempo de agitação (3,0 min).

Figura 4.3 – Espuma formada nas condições dos experimentos: a) Experimento 1 ( $C = 2\%$ ;  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{ag}} = 3,0\text{ min}$ ) e b) Experimento 6 ( $C = 6\%$ ;  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{ag}} = 7,0\text{ min}$ ).



O diagrama de Pareto para a densidade da espuma do sangue bovino (Figura 4.4) mostra que ambas as variáveis, concentração de Emustab® e tempo de agitação, são estatisticamente significativas, ou seja, seus valores afetam de maneira significativa a densidade da espuma formada.

Figura 4.4 – Diagrama de Pareto para a Densidade da Espuma ( $\text{g/cm}^3$ ).



A densidade da espuma apresenta dependência de maneira praticamente igual tanto pra concentração de Emustab® quanto pra o tempo de agitação além da interação destas duas variáveis, e ao utilizar os seus menores valores de níveis, a espuma formada não é estável, fazendo-se necessário encontrar um valor mínimo para cada variável, para que seja possível a formação de uma espuma estável adicionando pouco Emustab® ao sangue e com baixo tempo de agitação, valores que correspondem a 3% de concentração e 5,0 min de agitação.

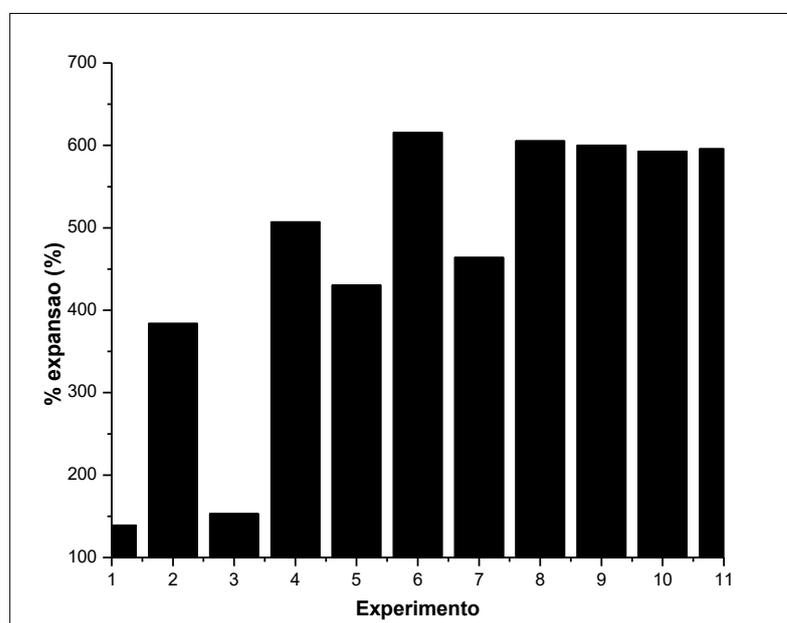
Ambas as variáveis, concentração de Emustab® e tempo de agitação, exercem uma influencia negativa na densidade, ou seja, quanto menores forem os seus valores, maior será a densidade, porém para a secagem a espuma gerada deve apresentar uma densidade baixa, o que significa uma quantidade maior de bolhas de ar formadas no interior da espuma e uma menor quantidade de líquido, sendo preferível trabalhar com níveis superiores de ambas as variáveis.

#### 4.1.2 Porcentagem de Expansão da Espuma

A porcentagem de expansão da espuma desempenha um papel importante durante a secagem, pois auxilia uma melhor circulação da água durante o processo, já que ao serem formadas, as bolhas de ar ficam separadas por lamelas de água que acabam evaporando quando submetidas à secagem (MARINOVA et al., 2009).

Na Figura 4.5 são mostrados os valores obtidos para a porcentagem de expansão da espuma do sangue.

Figura 4.5 – Porcentagem de expansão média da espuma do sangue bovino.

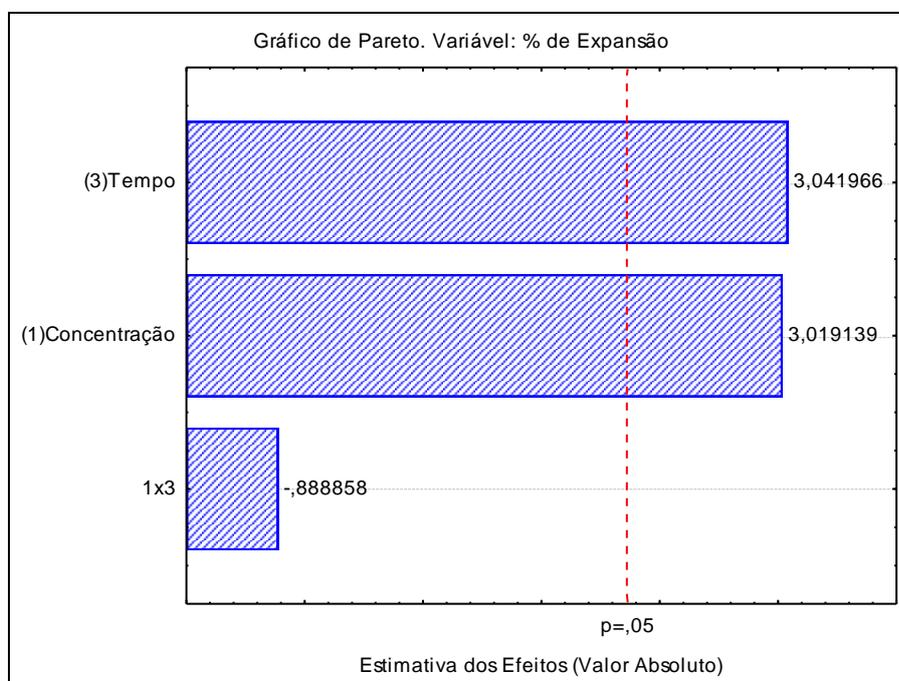


Foi observado na Figura 4.5 que os maiores valores para porcentagem de expansão encontrada são referentes aos experimentos nos níveis superiores das variáveis: concentração de Emustab® e tempo de agitação, que são os experimentos 6 e 8, onde foi utilizada a concentração de Emustab® de 6% e o tempo de agitação de 7,0 min.

Os valores de porcentagem de expansão para os experimentos 1 e 3 são os menores, devido aos experimentos apresentarem a concentração de Emustab® e o tempo de agitação nos níveis inferiores, 2% e 3,0 min, respectivamente. Ocasionalmente a comparação com a densidade é feita de modo que a baixa expansão gera uma espuma com maior densidade, e uma alta expansão gera uma espuma com menor densidade.

A análise estatística dos resultados mostra que tanto a concentração de Emustab® quanto o tempo de agitação são estatisticamente significativos em relação à porcentagem de expansão da espuma (Figura 4.6)

Figura 4.6 – Diagrama de Pareto para a porcentagem de expansão da espuma.



Ambas as variáveis, concentração de Emustab® e tempo de agitação, exercem uma influência de sinal positivo na capacidade de expansão, ou seja, quanto maiores forem os seus valores, maior será a expansão obtida pela espuma, facilitando no processo de secagem.

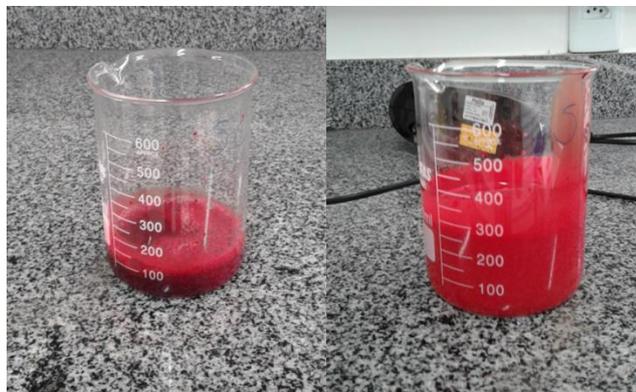
A porcentagem de expansão da espuma pode ser relacionada com a densidade da espuma obtida, ou seja, caso a espuma obtida apresente um valor baixo de densidade, a quantidade de ar que é aprisionado em sua estrutura é maior, levando a uma maior porcentagem de expansão. Os menores valores de densidade e maiores valores de porcentagem de expansão foram obtidos pelos experimentos 6 e 8, onde ambos os experimentos foram feitos utilizando os níveis superiores de concentração e tempo de agitação.

#### 4.1.3 Capacidade de Incorporação de Ar

A capacidade de incorporação de ar está relacionada com a quantidade de ar que é introduzida em uma solução, ou seja, durante a agitação o quanto de espuma é formado a

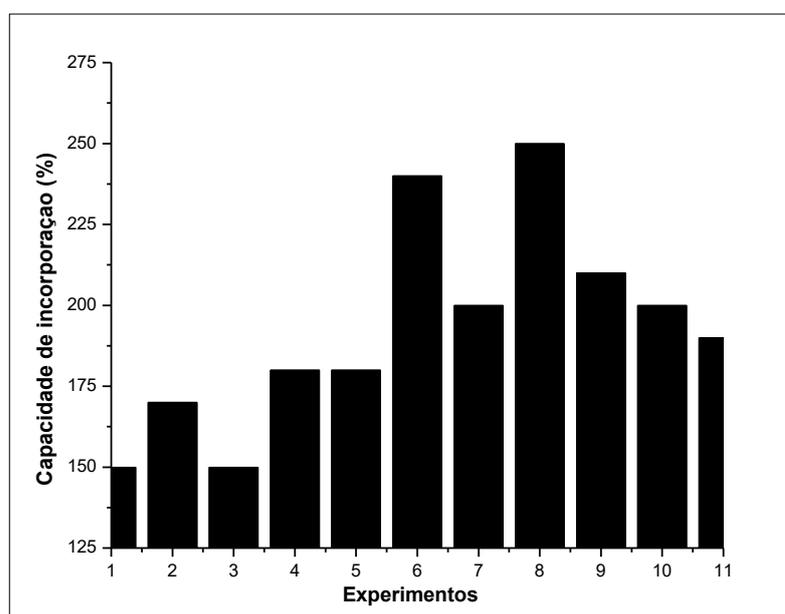
partir de um volume de solução. A Figura 4.7 mostra o antes e depois do teste respectivamente.

Figura 4.7 – Antes e depois respectivamente do *over run*.



Os resultados obtidos para a capacidade de incorporação de ar para os onze experimentos são mostrados na Figura 4.8

Figura 4.8 – Resultados dos testes de Capacidade de Incorporação de ar.



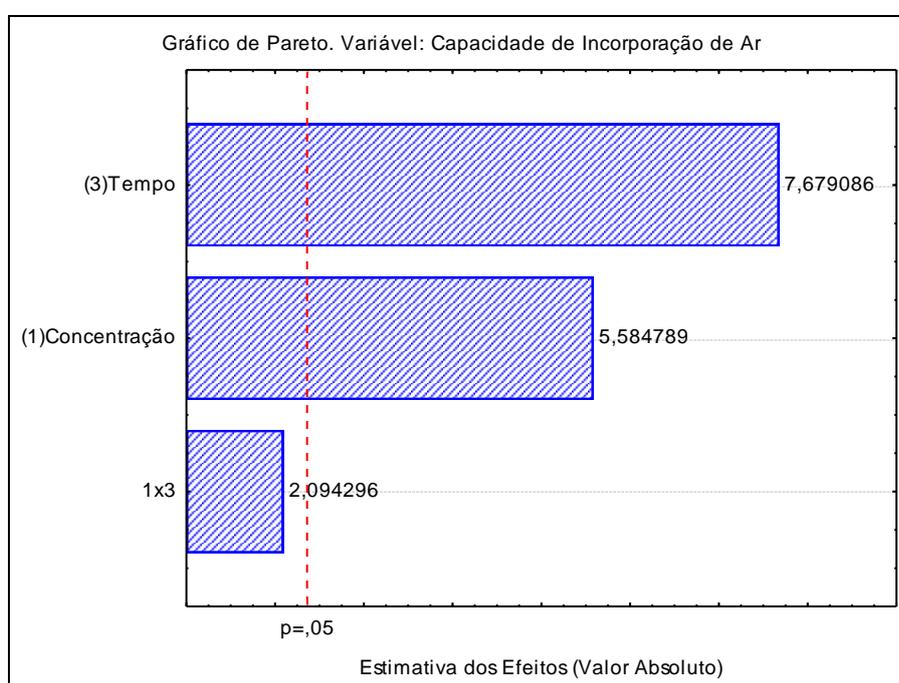
De maneira similar as análises da densidade e da porcentagem de expansão da espuma, a capacidade de incorporação de ar leva em conta apenas a concentração de Emustab® e o tempo de agitação em batedeira, já que a temperatura que é realizada o experimento é a temperatura ambiente. Sendo assim os experimentos 1 e 3 correspondem exatamente aos pontos onde os níveis estão nos valores mínimos para ambas as variáveis

consideradas no estudo, 2% para a concentração de Emustab® e 3,0 min para o tempo de agitação.

Os resultados apresentados para os experimentos 1 e 3 mostram um valor de 150% de incorporação de ar, ou seja, de 100 mL de sangue conseguiu-se formar 250 mL de espuma. Em conjunto com as outras duas propriedades, densidade e porcentagem de expansão, observou-se que valores a partir de 180% já são valores bons para o parâmetro, sendo que o ideal é que se obtenham valores a partir de 200%.

Na Figura 4.9 é mostrado o diagrama de Pareto para a capacidade incorporação.

Figura 4.9 – Diagrama de Pareto para o *over run*



Com base no diagrama de Pareto presente na Figura 4.9, foi observado que as variáveis tempo de agitação e concentração de Emustab®, apresentam efeito estatisticamente significativo na capacidade de incorporação de ar da espuma do sangue, sendo o tempo de agitação a variável que mais influenciou.

De maneira geral a densidade, a porcentagem de expansão e a capacidade de incorporação de ar dependem diretamente da concentração do Emustab® e do tempo de agitação, de modo que para a densidade e para a porcentagem de expansão da espuma as duas variáveis são quase equivalentes, apresentando quase a mesma dependência. Já no caso da capacidade de incorporação de ar, o tempo de agitação apresentou maior influência do que a concentração de Emustab®.

#### 4.1.4 Teste de Estabilidade em Estufa

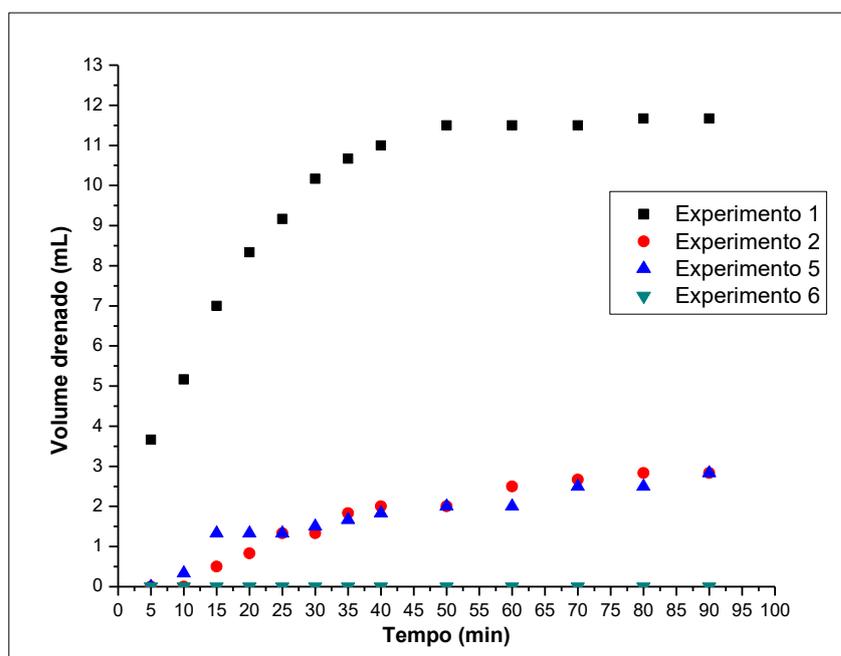
As espumas são sistema instáveis e por isso, além da capacidade de incorporação de ar é importante avaliar sua estabilidade, ou seja, sua habilidade de resistir à perda de bolhas de ar (LAU E DICKINSON, 2004).

A estabilidade das espumas também pode ser influenciada pelo tempo. Ratti e Kudra (2006) afirmaram que as espumas que não colapsarem em até uma hora, são consideradas mecanicamente estáveis durante todo o processo de secagem. Sob condições de aquecimento a cinética de estabilidade permite avaliar a manutenção da estrutura da espuma ao longo do processo.

Segundo Dantas (2010) a estabilização do volume despreendido das espumas, sob aquecimento, demonstra que na continuidade do aquecimento e evaporação da água a integridade do material poroso é mantida, facilitando a sua secagem.

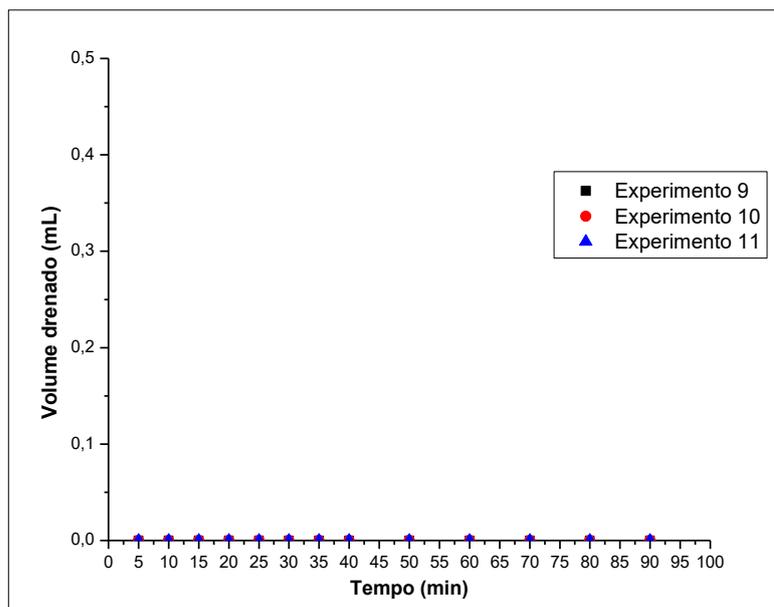
Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são apresentados os resultados da estabilidade das espumas do sangue bovino, obtidos da metodologia descrita no tópico 3.2.4, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Figura 4.10 – Resultados dos testes de estabilidade a 50 °C.



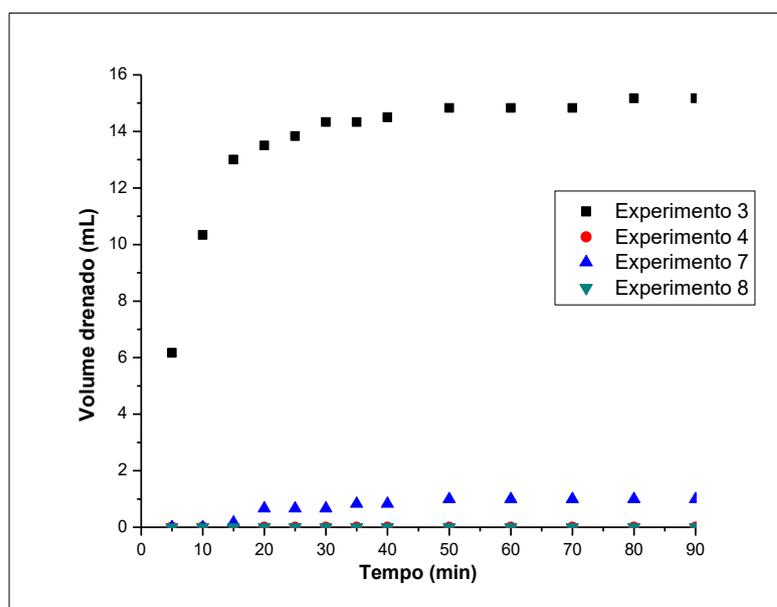
Foi observado na Figura 4.10 que três dos quatro experimentos realizados na temperatura de 50 °C apresentaram bons resultados quanto à estabilidade da espuma. O experimento de número 1 apresentou uma perda média de volume de 11,67 mL.

Figura 4.11 – Resultados dos testes de estabilidade a 60 °C, pontos centrais.



Observou-se da Figura 4.11, que nas condições experimentais dos pontos centrais, cuja temperatura é de 60 °C, a espuma é estável, pois não houve desprendimento de volume líquido durante todo o teste.

Figura 4.12 – Resultados dos testes de estabilidade a 70 °C.



De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.12, o experimento 3 apresentou um alto volume desprendido, isto porque os outros valores de concentração e tempo de agitação estão nos menores níveis, chegando a perder, em média, 15,17 mL durante

todo o experimento. O experimento 7 ainda apresentou uma perda de volume no teste, chegando a 1,0 mL ao final dos 90 minutos, cerca de 15 vezes menor do que o perdido pelo experimento três para a mesma temperatura, diferença explicada pelos fatores de formação da espuma, onde a espuma formada pelo experimento 7 apesar de apresentar baixa concentração de Emustab®, foi formada com o nível superior de tempo de agitação, favorecendo a formação de bolhas de ar no interior da estrutura e a formação de uma estrutura estável (KRASAEKOOPT E BHATIA, 2012).

Os experimentos de número 4 e 8 não apresentaram perda de volume durante o teste, ou seja, foi formada uma espuma estável e ao ser submetido à temperatura de 70 °C a drenagem de volume foi reduzida pelo alto desempenho da secagem devido às características da espuma.

Percebe-se que os experimentos tiveram um maior desprendimento de volume nos primeiros 30 min do processo.

É possível afirmar que a espuma formada com valores de concentração de Emustab® acima de 2% e/ou um tempo de agitação acima de 3,0 minutos é uma espuma que pode ser considerada estável, com uma perda de volume mínima.

#### 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SECAGEM DO SANGUE BOVINO

Para a secagem é importante realizar a análise estatística dos seus resultados, obtidos a partir do planejamento experimental fatorial completo proposto para a secagem apresentado na Tabela 3.4 deste trabalho, a fim de conhecer a influência das variáveis de entrada do processo nas respostas, umidade final e tempo de secagem.

Na Tabela 4.1 são mostrados os resultados finais de umidade em base seca ( $X_{bs}$ ), umidade em base úmida ( $X_{bu}$  (%)) e tempo de secagem ( $t_{secagem}$  (min)).

Tabela 4.1 - Valores de Umidade em base seca e tempo de agitação ao término da secagem.

Experimento	$X_{bs} \times 10^2$	$X_{bu}$ (%)	$t_{secagem}$ (min)
1	18,2	15,37	410
2	21,6	17,79	400
3	7,8	7,23	210
4	8,9	8,17	220
5	19,5	16,29	395
6	20,0	16,68	400
7	9,5	8,68	220
8	7,4	6,9	190
9	12,2	10,89	250
10	10,1	9,21	220
11	11,5	10,35	190

#### 4.2.1 Umidade final em base seca

A umidade final do produto representa o quanto ainda existe de líquido dentro do material ao término da secagem e é um parâmetro que juntamente com a atividade de água ajuda a determinar a quantidade do material obtido.

No caso do sangue bovino os resultados da análise estatística para a umidade final do sangue, indicam que apenas a temperatura é estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) gerando um modelo que é representado pela Equação 4.1.

$$X_{bs} = 0,4761 - 0,005713T \quad (4.1)$$

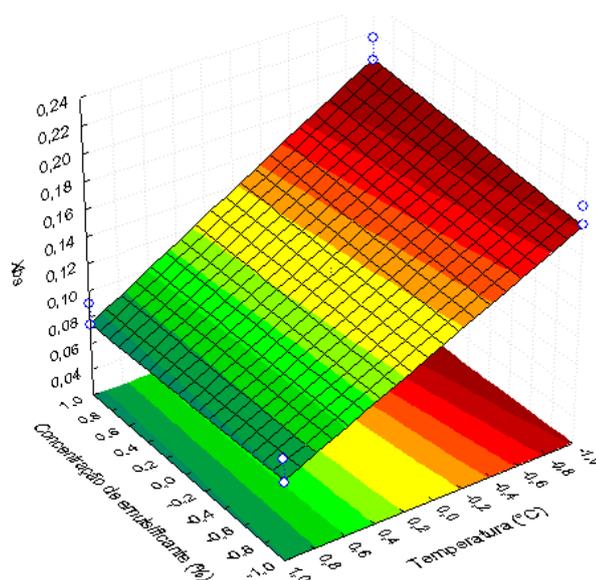
A temperatura influencia de forma significativa na umidade final do produto, ou seja, quanto maior a temperatura menor será a umidade do pó, o que é o desejado. Esse modelo possui um coeficiente de determinação de 0,938 e um erro padrão de 0,066491, isto para um nível de confiança de 95%.

A análise de variância dos dados para a variável umidade final em base seca (Apêndice A) revela que a 95% de confiança, o modelo representado pela Equação 4.1 é estatisticamente significativo e não apresenta falta de ajuste, já que através do teste F tem-se que, o valor de  $F_{calculado}$  é maior que o  $F_{tabelado}$ ,  $136,834 > 5,117$ , considerando o nível de confiança e os graus de liberdade da regressão e do resíduo, pode-se dizer que o modelo apresentado é estatisticamente significativo a partir da ANOVA.

Além de o modelo ser estatisticamente significativo com base no teste F, ele também não apresenta falta de ajuste, já que o mesmo teste que leva em consideração a falta de ajuste e o erro puro do modelo revela que o  $F_{\text{calculado}}$  é menor que o  $F_{\text{tabelado}}$ ,  $1,478 < 19,353$ , o que caracteriza um modelo sem falta de ajuste.

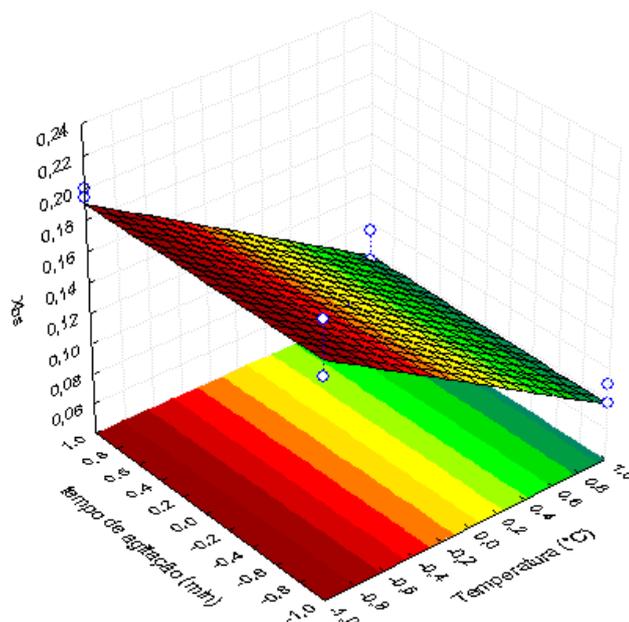
Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 estão representadas as superfícies de resposta obtidas para a variável em análise ao se manter tempo de agitação, concentração de Emustab® e temperatura de secagem constantes, em seus níveis médios, para a produção das três superfícies, respectivamente.

Figura 4.13 – Superfície de resposta para a variável umidade em base seca, mantendo o tempo de agitação constante.



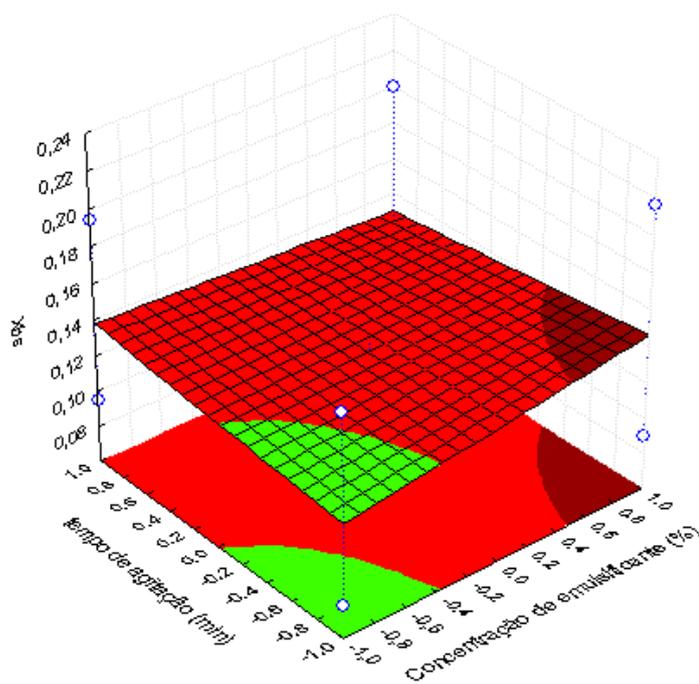
Pode-se observar da Figura 4.13 a dependência da variável com a temperatura de secagem, onde no menor nível de temperatura tem-se os valores mais altos para a umidade e no maior nível de temperatura o menor valor de umidade, em contrapartida a concentração de emulsificante não apresentou influência no valor final da umidade, o que pode ser claramente observado na Figura 4.13. Para esta superfície de resposta o tempo de agitação foi mantido constante no nível 0, no seu valor médio.

Figura 4.14 – Superfície de resposta para a variável umidade em base seca, mantendo a concentração de Emustab® constante.



De maneira análoga à Figura 4.14, a análise sobre a umidade em base seca final do produto mostra que o tempo de agitação não apresenta influência sobre a mesma e apenas a temperatura atua significativamente no seu valor.

Figura 4.15 – Superfície de resposta para a variável umidade em base seca, mantendo a temperatura constante.



Pode ser verificado na Figura 4.15 que ambas as variáveis apresentadas no gráfico não exercem influência significativa no seu valor final, sendo assim possível operar nos seus valores mínimos, já que a sua influência sobre a umidade final do produto é mínima, isto leva a uma redução na utilização de Emustab® e no tempo de agitação da espuma, levando também a uma redução de custo por produção de lote do pó.

#### 4.2.2 Tempo de secagem

O tempo de secagem do material é uma variável importante para qualquer projeto de secagem, já que influencia diretamente na questão do custo do projeto com o gasto de energia e na eficiência do processo com relação à obtenção de um material seco em um tempo baixo.

Com o sangue bovino nas três temperaturas usadas, observou-se uma diferença de até três horas de uma temperatura para outra, o que teoricamente já era esperado devido à temperatura ser a principal variável que influencia na secagem em camada de espuma nesse processo.

Um modelo estatístico foi gerado através da análise estatística de modo similar ao gerado para a umidade. O modelo apresenta coeficientes estatisticamente significativos ( $p < 0,05$ ) e é representado pela Equação 4.2.

$$t_{\text{secagem}} = 856,0227 - 9,5625T \quad (4.2)$$

A temperatura também influencia de forma significativa no tempo final da secagem, ou seja, quanto maior a temperatura menor será o tempo da secagem, o que é o desejado. Esse modelo possui um coeficiente de determinação de 0,8284 e um erro padrão de 64,2339, se comparados aos valores obtidos para a umidade em base seca, são valores considerados inferiores, isto a um nível de confiança de também 95%.

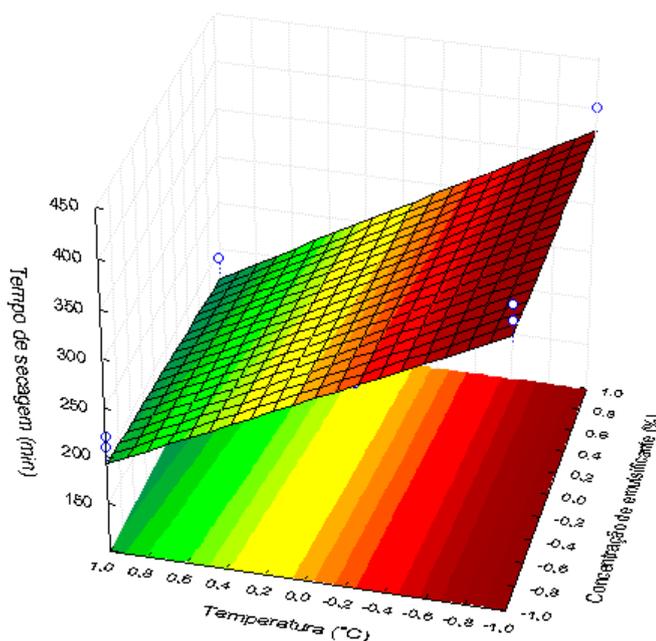
A análise de variância dos dados para a variável umidade em base seca (Apêndice B) revela que a 95% de confiança, o modelo representado pela Equação 4.2 é estatisticamente significativo e não apresenta falta de ajuste, já que através do teste F tem-se que, o valor de  $F_{\text{calculado}}$  é maior que o  $F_{\text{tabelado}}$ ,  $43,722 > 5,117$ , considerando o nível de confiança e os graus de liberdade da regressão e do resíduo, pode-se dizer que o modelo apresentado é estatisticamente significativo a partir da ANOVA.

Além de o modelo ser estatisticamente significativo com base no teste F, ele também não apresenta falta de ajuste, já que o mesmo teste que leva em consideração a falta de ajuste

e o erro puro do modelo revela que o  $F_{\text{calculado}}$  é menor que o  $F_{\text{tabelado}}$ ,  $2,321 < 19,353$ , o que caracteriza um modelo sem falta de ajuste.

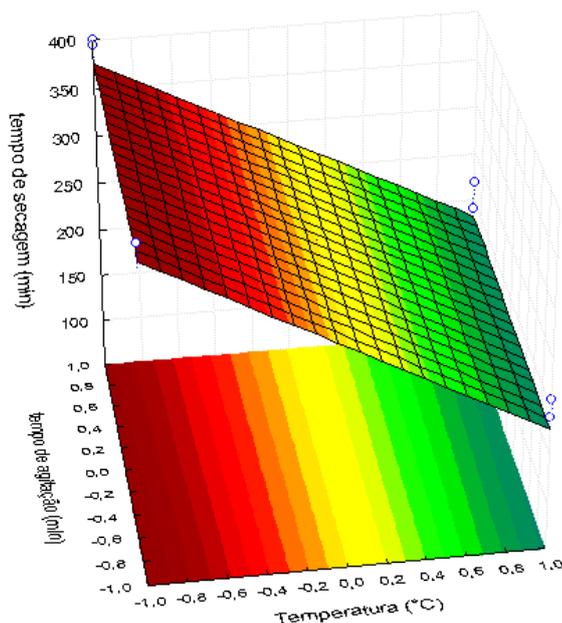
Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 são representadas as superfícies de resposta obtidas para a variável em análise ao se manter tempo de agitação, concentração de Emustab® e temperatura de secagem constantes, em seus níveis médios, para a produção das três superfícies, respectivamente.

Figura 4.16 – Superfície de resposta para a variável: tempo de secagem, mantendo o tempo de agitação constante.



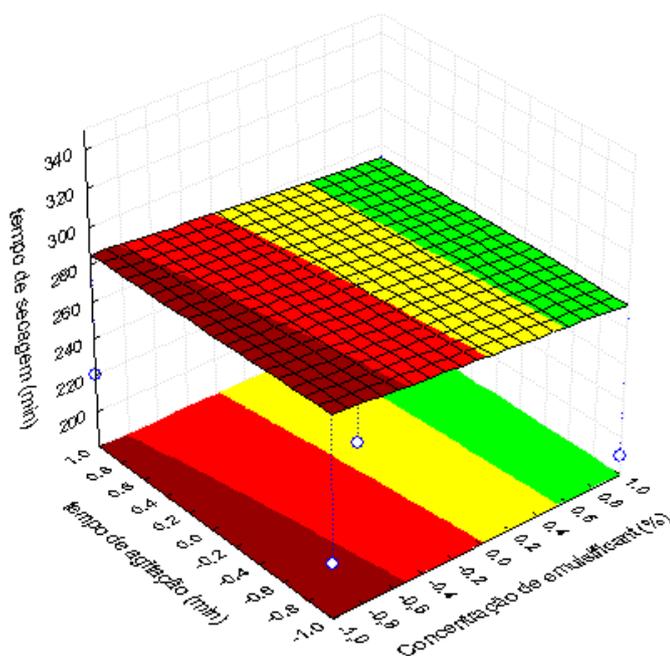
O tempo de secagem também apresentou dependência apenas com a temperatura de secagem, e na Figura 4.16 é mostrada de forma clara esta dependência. Pode ser observado que em níveis menores de temperatura o tempo de secagem é maior que o dobro do tempo de secagem obtido no nível máximo de temperatura, o tempo de agitação foi mantido constante no seu nível mínimo, o que corresponde a 5 min, e a concentração de Emustab® que varia de 3 a 6% não apresenta influência significativa sobre o tempo de secagem, observa-se pela superfície que em toda a faixa de trabalho desta variável o tempo de secagem apresentou uma variação muito baixa, confirmando o modelo obtido pela Equação 4.2, onde a temperatura de secagem é a única que apresenta valor estatisticamente significativo para o processo de secagem.

Figura 4.17 – Superfície de resposta para a variável: tempo de secagem, mantendo a concentração de Emustab® constante.



É possível observar na Figura 4.17 que o tempo de agitação não apresenta influência significativa no tempo de secagem, variando muito pouco em toda a sua faixa de aplicação, entre os 5 e 9 min de agitação, e como já observado para a temperatura a sua influência pode ser vista de forma direta nos resultados, onde a 70 °C o tempo de secagem fica em torno dos 200 min.

Figura 4.18 – Superfície de resposta para a variável: tempo de secagem, mantendo a temperatura de secagem constante.



A superfície de resposta observada na Figura 4.18 mostra a baixa influência das variáveis tempo de agitação e concentração de Emustab® sobre o tempo de secagem, resultado que é confirmado pelo modelo obtido para esta variável, onde ambos não apresentaram dados estatisticamente significativos.

#### 4.3 CINÉTICA E AJUSTE DE MODELOS DOS DADOS DA SECAGEM

As curvas da cinética de secagem do sangue bovino estão apresentadas nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21. Os dados estão dispostos na forma de umidade adimensional ( $X/X_0$ ) pelo tempo de secagem em minutos para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C respectivamente.

A partir destas figuras é possível a análise da secagem em respeito ao seu comportamento, onde é possível observar os diferentes períodos de secagem.

Figura 4.19 – Curvas de secagem da espuma de sangue bovino na temperatura de 50 °C.

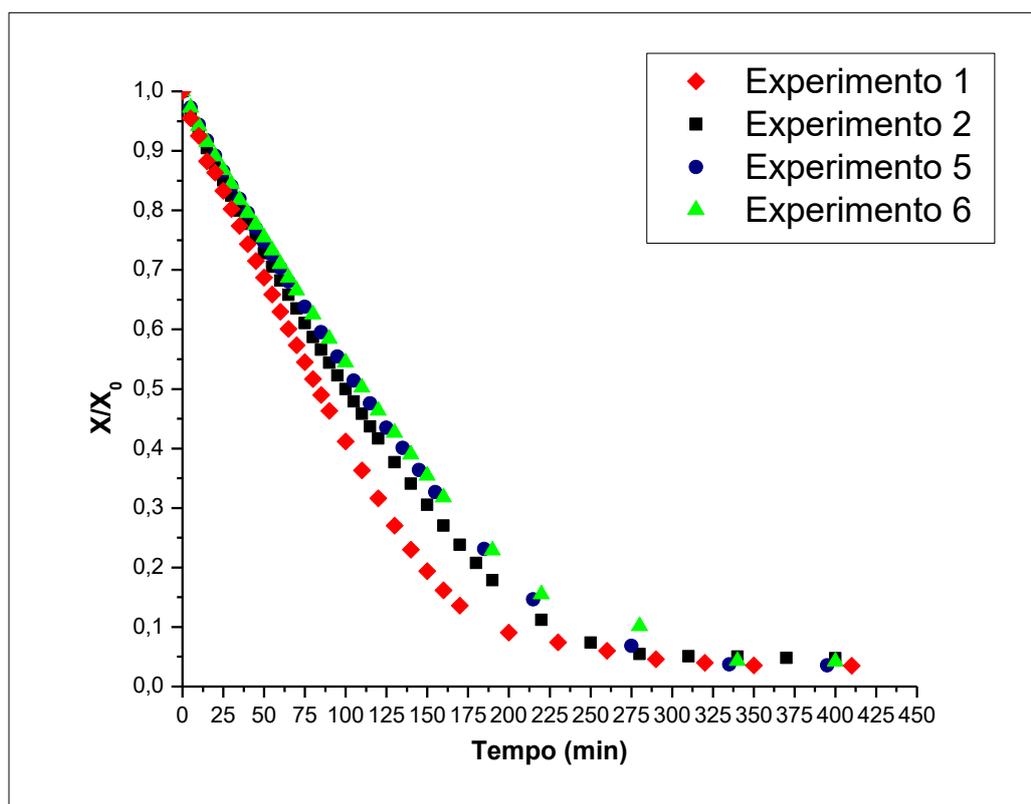


Figura 4.20 – Curvas de secagem da espuma de sangue bovino na temperatura de 60 °C.

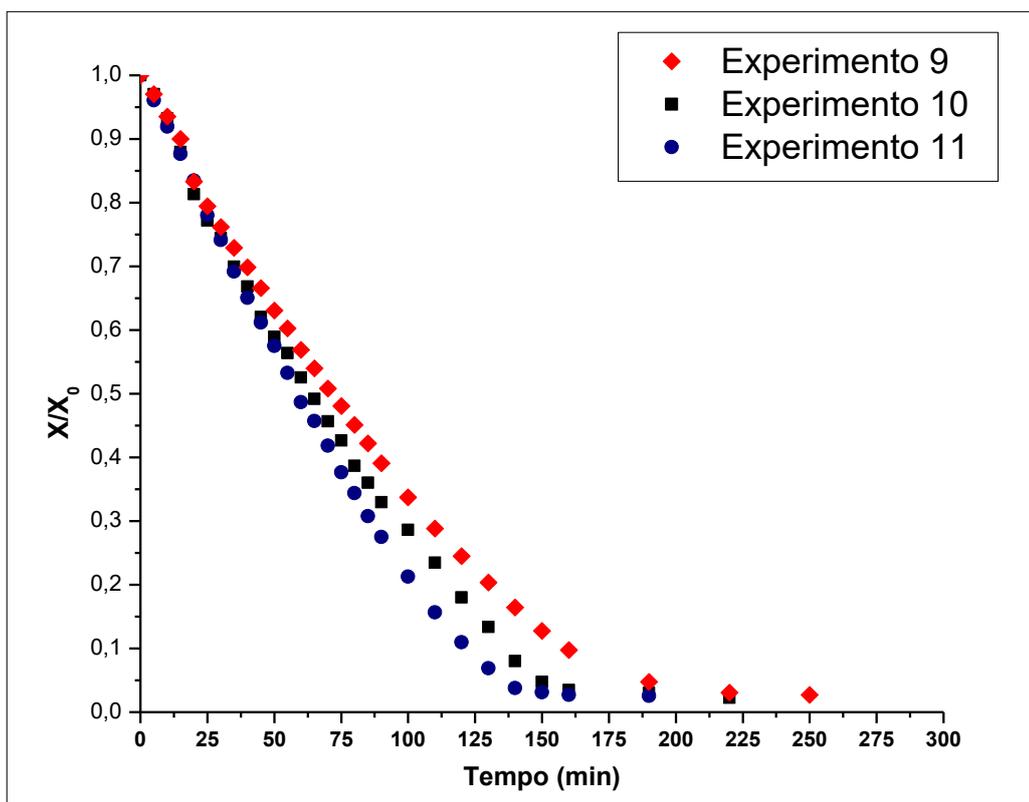
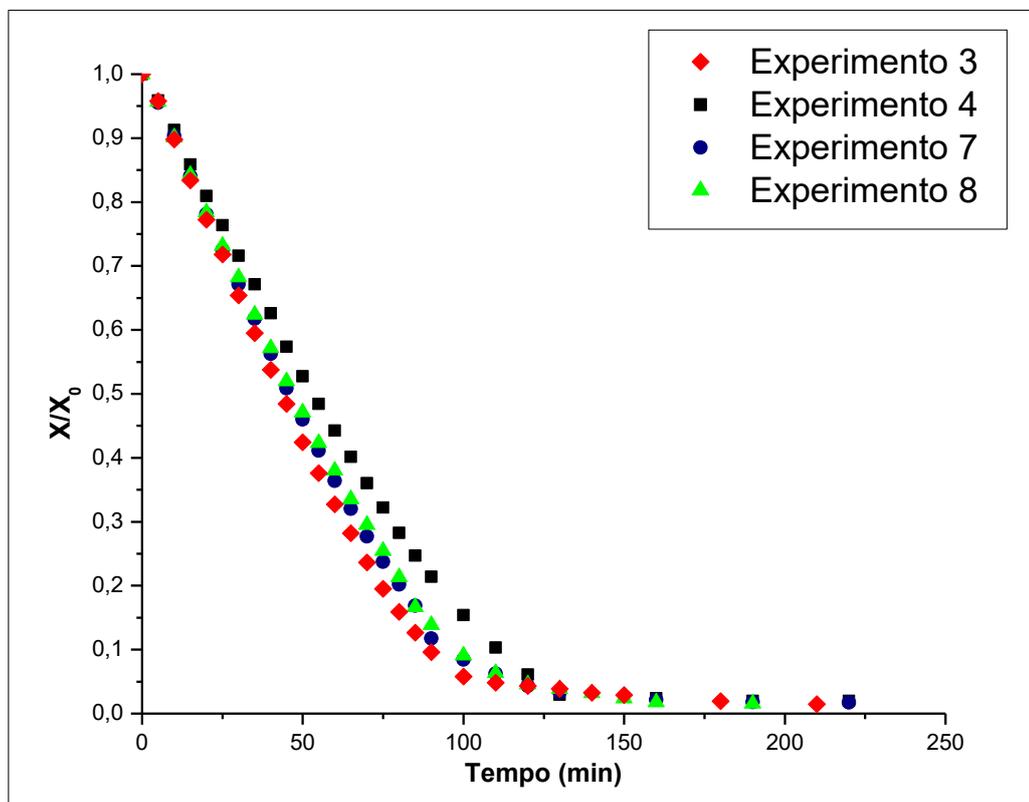


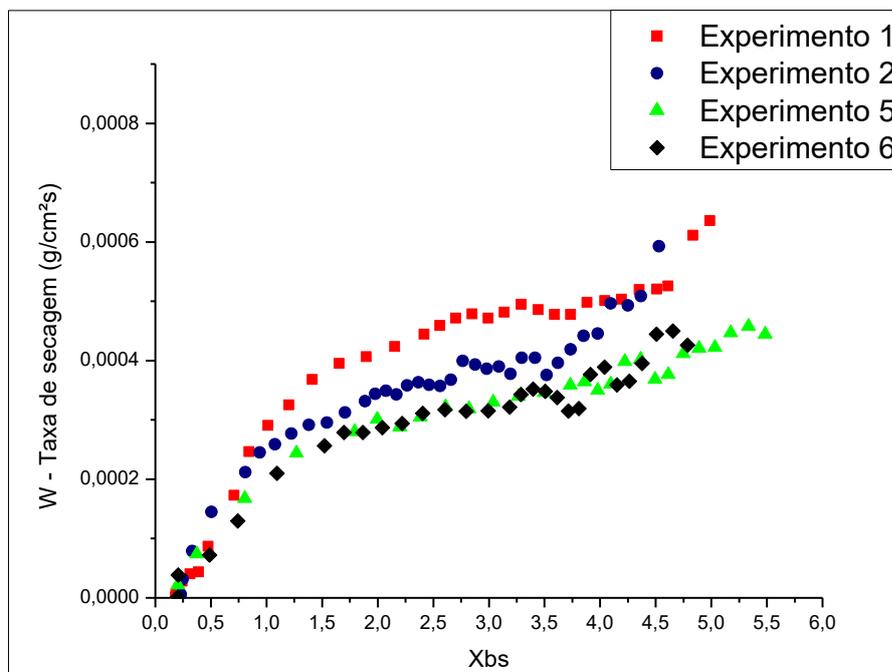
Figura 4.21 – Curvas de secagem da espuma de sangue bovino na temperatura de 70 °C.



Como pôde ser visualizado nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, o comportamento da secagem demonstra que ela ocorre em ambos os períodos de taxa constante e decrescente, observa-se também que o tempo de secagem variou de acordo com a temperatura de secagem utilizado, sendo um menor tempo para a temperatura de 70 °C, e um maior tempo de secagem para a temperatura de 50 °C, isto ocorre devido a maior transferência de calor que ocorre entre o ar e a camada de espuma, mostrando que a temperatura influencia de forma direta no processo de secagem.

Na Figura 4.22 é mostrada a taxa de secagem para a temperatura de 50 °C, evidenciando bem a existência de ambos os períodos de secagem citados no paragrafo acima.

Figura 4.22 – Taxa de secagem pela unidade em base seca para os experimentos com temperatura de 50 °C.



O ajuste dos dados experimentais foi realizado com base nos modelos matemáticos mostrados na Tabela 2.3. Os resultados apresentados são apenas dos modelos que apresentaram ajustes estatisticamente significativos e foram condensados de forma similar às Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, de modo que cada faixa de temperatura tenha seu próprio modelo.

O ajuste dos modelos matemáticos foi feito utilizando como critério de seleção dos modelos a análise estatística, caso o modelo apresente coeficientes estatisticamente significativos, o valor do coeficiente de determinação e o erro da estimativa, onde o valor do coeficiente acima de 0,98 e o erro da estimativa abaixo de 0,04.

Na Tabela 4.2 são mostrados os resultados dos modelos selecionados com os seus parâmetros para a temperatura de 50 °C, válida para os experimentos 1, 2, 5 e 6 do planejamento experimental fatorial.

Tabela 4.2 – Ajuste dos modelos da cinética de secagem para a temperatura de 50 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos						
	k	a	C	b	N	R <sup>2</sup>	S
Newton	0,00745	-	-	-	-	0,971	0,0513
Page	0,00269	-	-	-	1,219	0,983	0,0398
Logarítmico	0,00671	1,112	-0,0915	-	-	0,979	0,0441
Henderson e Pabis	0,00796	1,045	-	-	-	0,975	0,0478
Dois termos Exp.	0,0109	1,759	-	-	-	0,983	0,0395
Wang e Singh	-	-0,0060	-	9,14E-06	-	0,984	0,0386

De acordo com os dados da Tabela 4.2, três modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, sendo eles: Page (1991), Dois termos exponencial (1980) e de Wang e Singh (1978); tais modelos apresentaram bons valores para o coeficiente de determinação e os menores erros da estimativa, abaixo de 0,04. São representados matematicamente pelas Equações 4.3, 4.4 e 4.5 respectivamente.

$$RU = e^{(-0,002686t^{1,2188})} \quad (4.3)$$

$$RU = 1,7588e^{(-0,010914t)} + (1-1,7588)e^{(-0,01920t)} \quad (4.4)$$

$$RU = 1 - 0,0060t + 9,14E - 06t^2 \quad (4.5)$$

Silva (2013) também utilizou Page para a representação dos dados experimentais e obteve valores próximos dos obtidos pelo trabalho com o sangue, o valor de k obtido de 0,0016 e de n igual a 1,4976 para a temperatura de 50 °C, apresentando um coeficiente de determinação maior que 0,99 e um erro menor de 0,03.

O modelo de Page é utilizado com frequência por autores ao se descrever o efeito da temperatura na taxa de secagem, onde o valor de k representa a constante de secagem e o valor de n está diretamente relacionado com a umidade relativa do ar, Page (1949).

Os gráficos com os ajustes dos três modelos Page, Dois termos exponencial e Wang e Singh são mostrados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25.

Figura 4.23 – Ajuste para o modelo de Page na temperatura de 50 °C.

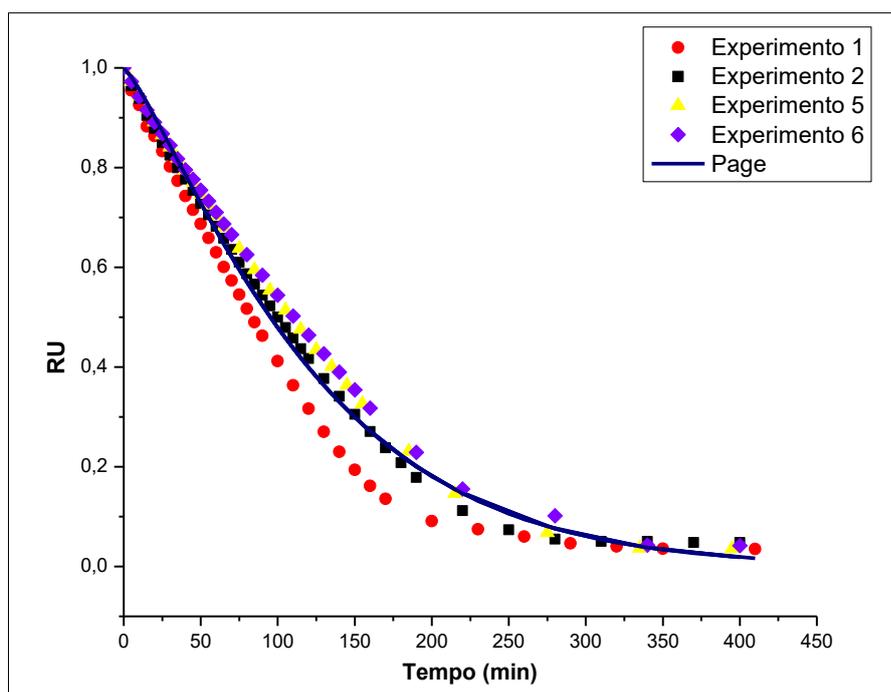


Figura 4.24 – Ajuste para o modelo de Dois termos exponencial na temperatura de 50 °C.

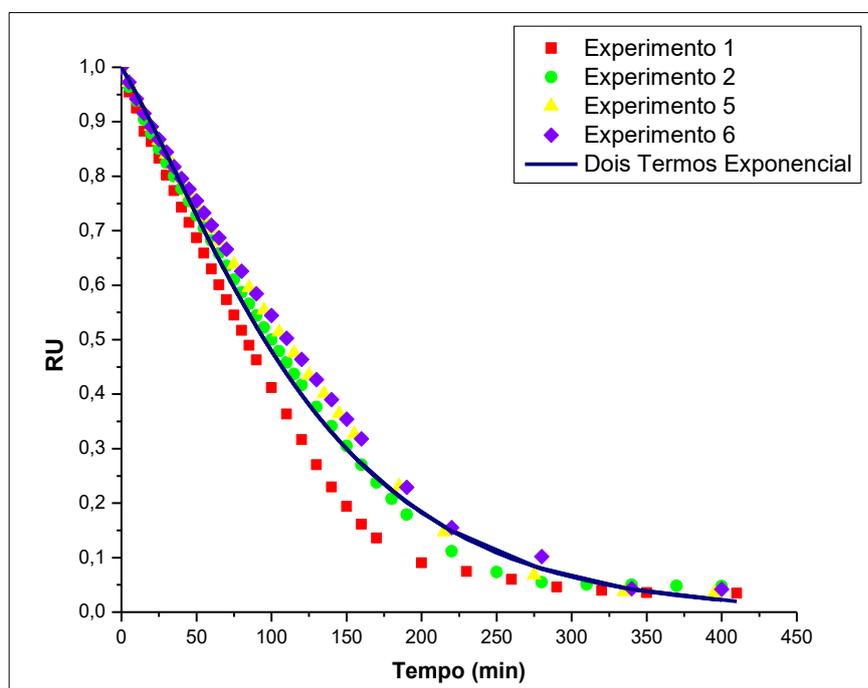
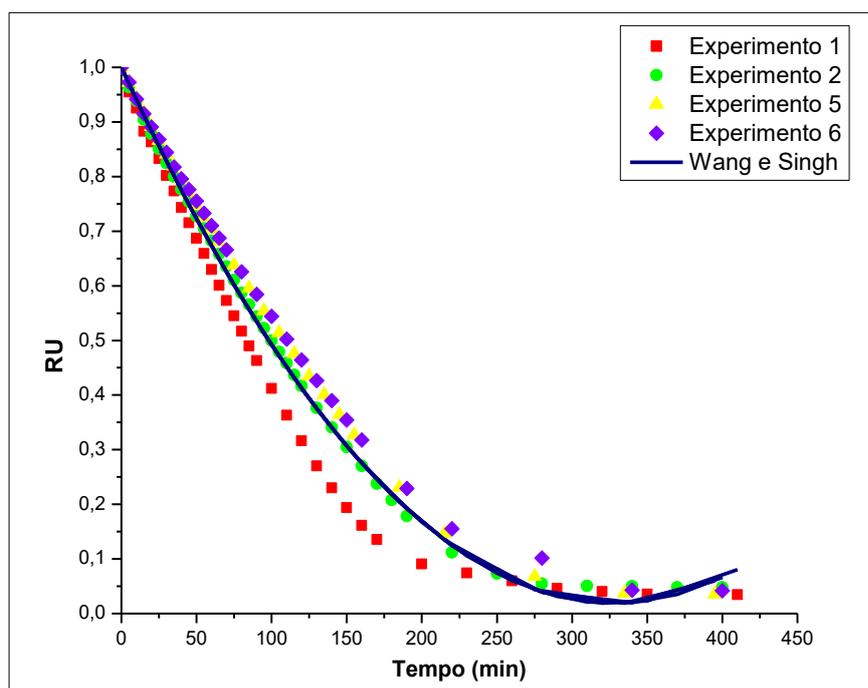


Figura 4.25 – Ajuste para o modelo de Wang e Singh na temperatura de 50°C.



Nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25, que apresentam os ajustes dos dados experimentais aos modelos utilizados, são mostrados também que os modelos de Page e Dois termos Exp. foram os que melhor se adequaram aos dados experimentais, e o modelo de Wang e Singh, como visto na Figura 4.25, apresenta um comportamento quadrático e por isso apresenta um aumento no valor da razão umidade, o que de fato não ocorre, e apesar de apresentar um bom resultado estatístico, o modelo não apresenta significado físico coerente para o processo de secagem a partir dos 350 min, podendo ser descartado.

Na secagem do Achachairu em camada de espuma, estudada por Silva et al. (2015), o modelo de Wang e Singh (1978) também apresentou valores considerados bons matematicamente, porém, ficando abaixo dos obtidos pelo modelo de Page (1949).

Já em estudo da secagem da polpa de abacate em camada de espuma realizado por Alves e Rodovalho (2016) o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais e apresentou boa representação gráfica foi o modelo de Wang e Sing.

Na Tabela 4.3 são mostrados os resultados dos modelos selecionados com os valores dos seus parâmetros para a temperatura de 60 °C, válidos para os experimentos de número 9, 10 e 11, que são os pontos centrais do planejamento experimental fatorial completo.

Tabela 4.3 – Modelagem da cinética de secagem para a temperatura de 60 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos						
	k	A	c	b	n	R <sup>2</sup>	S
Newton	0,0120	-	-	-	-	0,960	0,0614
Page	0,00284	-	-	-	1,333	0,984	0,0390
Logarítmico	0,00939	1,234	-0,193	-	-	0,980	0,0432
Henderson e Pabis	0,0131	1,075	-	-	-	0,969	0,0545
Dois termos Exp.	0,0182	1,855	-	-	-	0,983	0,0405
Wang e Singh	-	-0,00935	-	2,19E-05	-	0,986	0,0368

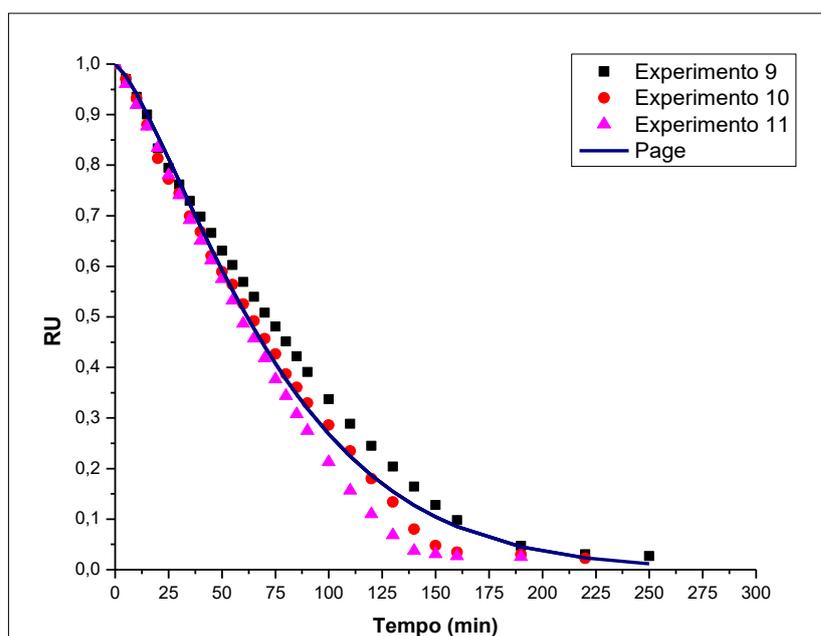
De acordo com os dados da Tabela 4.3, dois modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, sendo eles o de Page (1991) e o de Wang e Singh (1978); tais modelos apresentaram bons valores para o coeficiente de determinação e os menores erros da estimativa, abaixo de 0,04, sendo representados pelas Equações 4.6 e 4.7 respectivamente.

$$RU = e^{(-0,002842t^{1,3329})} \quad (4.6)$$

$$RU = 1 - 0,009355t + 2,19E - 05t^2 \quad (4.7)$$

Como já visto para a temperatura de 50 °C o modelo de Wang e Singh apesar de apresentar bons resultados matemáticos, não apresenta significado físico quando representa os dados experimentais. Assim sendo interessante o ajuste dos dados apenas ao modelo de Page para a temperatura de 60 °C, o que pode ser observado na Figura 4.26.

Figura 4.26 – Ajuste para o modelo de Page na temperatura de 60 °C.



O ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page foi considerado satisfatório, em comparação com Lopes et al. (2015) que obtiveram parâmetros semelhantes para o mesmo modelo na mesma temperatura para a secagem do yacon, onde o autor obteve valores de  $R^2$  superior a 0,99 e um erro de 0,0124.

Silva et al. (2015) utilizaram o modelo de Page para descrever o processo de secagem de polpa de Achachairu em camada de espuma, obtendo valores de coeficiente de determinação acima de 0,99 e erro da estimativa em torno de 0,0010. Assim para a temperatura de 60 °C o modelo de Page pode ser ajustado para descrever os dados experimentais.

Na Tabela 4.4 são mostrados os resultados dos modelos selecionados com os seus parâmetros para a temperatura de 70 °C, válida para os experimentos de número 3, 4, 7 e 8.

Tabela 4.4 – Modelagem da cinética de secagem para a temperatura de 70 °C.

Modelo	Parâmetros dos modelos						
	k	A	c	b	n	$R^2$	S
Newton	0,0166	-	-	-	-	0,959	0,0650
Page	0,00296	-	-	-	1,427	0,990	0,0327
Logarítmico	0,0152	1,175	-0,104	-	-	0,979	0,0475
Henderson e Pabis	0,0187	1,097	-	-	-	0,971	0,0557
Dois termos Exp.	0,0262	1,934	-	-	-	0,988	0,0357
Wang e Singh	-	-0,00560	-	9,14E-06	-	0,986	0,0388

De acordo com os dados da Tabela 4.4, três modelos se ajustaram bem aos dados experimentais, sendo eles o de Page (1991), o Dois termos exponencial (1980) e o de Wang e Singh (1978); tais modelos apresentaram bons valores para o coeficiente de determinação e os menores erros da estimativa, abaixo de 0,04, sendo os dois primeiros representados pelas Equações 4.8 e 4.9.

$$RU = e^{(-0,002957t^{1,4266})} \quad (4.8)$$

$$RU = 1,9344e^{(-0,02623t)} + (1-1,9344)e^{(-0,05074t)} \quad (4.9)$$

De forma análoga as duas temperaturas já vistas o modelo de Wang e Singh foi descartado levando em conta a não coerência física apresentada. Logo, os gráficos com os ajustes para a temperatura de 70 °C dos modelos de Page e Dois termos exp. estão representados nas Figuras 4.27 e 4.28.

Figura 4.27 – Ajuste para o modelo de Page na temperatura de 70 °C.

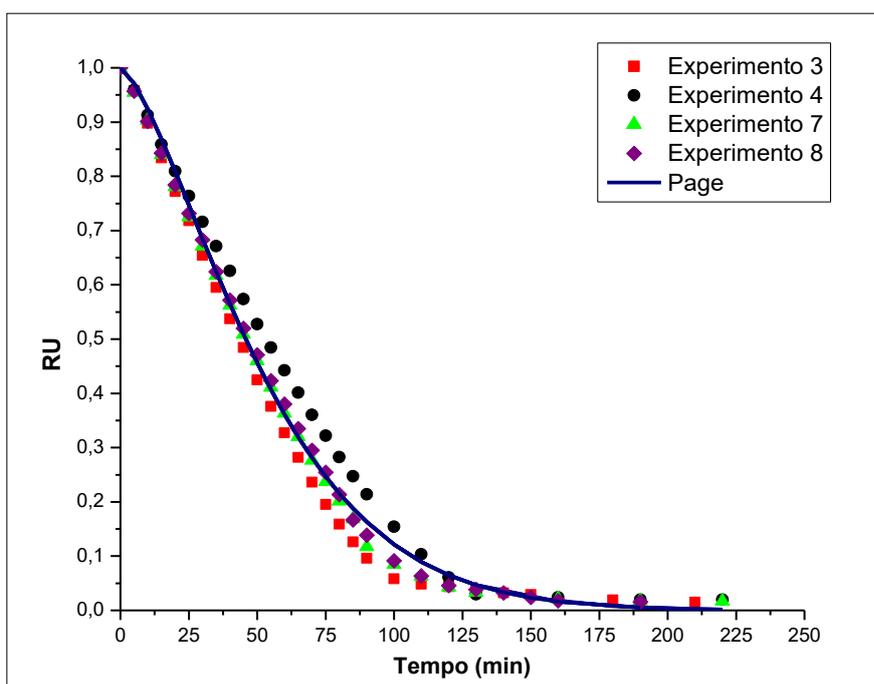
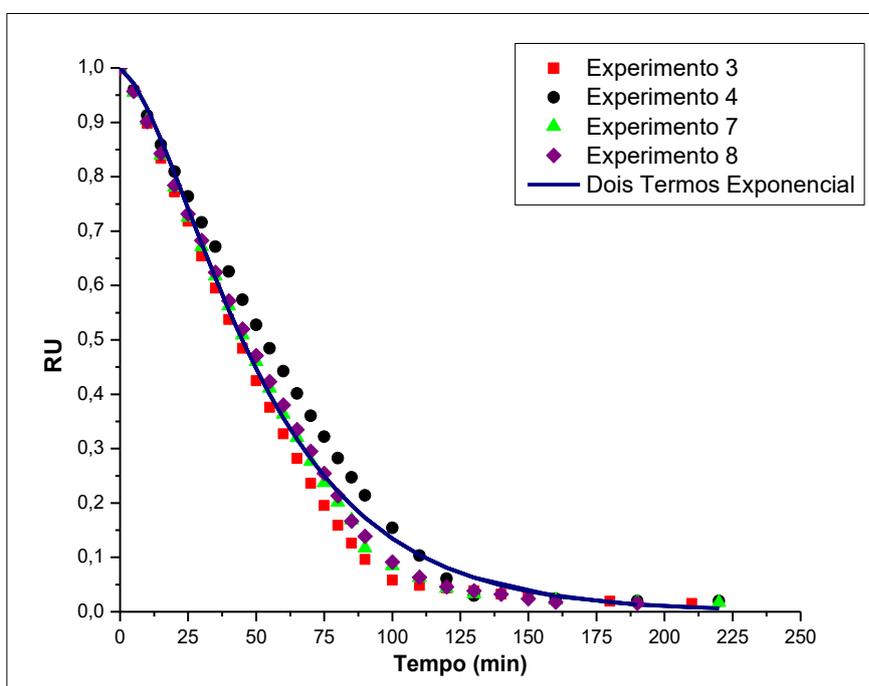


Figura 4.28 – Ajuste para o modelo Dois termos exponencial na temperatura de 70°C.



Ambos os modelos apresentaram um bom ajuste matemático e físico dos dados experimentais, porém o de Page foi o que obteve o melhor resultado com relação aos valores do coeficiente de determinação e ao erro, o maior e o menor valor respectivamente.

Resultados muito próximos dos obtidos por Guimarães (2017) para a secagem da polpa de manga, onde o modelo de Page também foi o melhor a se ajustar a temperatura de 70 °C.

Na temperatura de 70 °C o modelo de Page obteve o seu melhor ajuste dos dados experimentais, em comparação com as outras duas temperaturas, chegando a valores de 0,99 no coeficiente de determinação e apresentando o menor erro, Melo et al. (2013) também obtiveram resultados semelhantes ao apresentado no trabalho para a secagem da polpa do fruto do mandacaru, onde o modelo de Page apresentou valores superiores a 0,99 para o R<sup>2</sup> e um erro em torno de 0,0007.

Sousa et al. (2015) mostram que o ajuste para o modelo de Page aos dados da secagem de resíduos de *Spondias sp.* é satisfatório, sendo na temperatura de 70 °C o melhor resultado devido a maior taxa de remoção de água pelo método de secagem.

Em geral os modelos estudados apresentaram bons ajustes aos dados experimentais para a secagem do sangue bovino, exceto Wang e Singh (1978) que apresentou desvios para altos tempos de secagem.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA

A atividade de água é um parâmetro que ao ser verificado indica indiretamente a capacidade do material em ocorrer reações químicas e desenvolvimento de microrganismos. Os valores obtidos para a atividade de água do sangue em pó após a secagem estão mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados para a atividade de água.

Experimento	C (%)	T (°C)	t <sub>ag</sub> (min)	Aa
1	-1 (3)	-1 (50)	-1 (5)	0,280
2	1 (6)	-1 (50)	-1 (5)	0,272
3	-1 (3)	1 (70)	-1 (5)	0,152
4	1 (6)	1 (70)	-1 (5)	0,161
5	-1 (3)	-1 (50)	1 (9)	0,281
6	1 (6)	-1 (50)	1 (9)	0,273
7	-1 (3)	1 (70)	1 (9)	0,171
8	1 (6)	1 (70)	1 (9)	0,179
9	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)	0,237
10	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)	0,227
11	0 (4,5)	0 (60)	0 (7)	0,249

C – concentração; T - temperatura e t<sub>ag</sub> – tempo de agitação

Os valores encontrados para a atividade de água, descritos na Tabela 4.5, mostram que ao término da secagem a atividade de água do sangue em pó é baixa, onde fisicamente esses valores significam que o sangue em pó possui uma baixa capacidade para desenvolvimento de microrganismos e reações químicas em temperaturas ambientes.

Segundo Braga (2016) um produto com atividade de água de até 0,3 pode ser considerado um produto estável à reações de oxidação, microbiológicas e de escurecimento. Souza (2011) obteve valores de atividade de água entre 0,278 e 0,414 para o pó de cupuaçu secado também em camada de espuma na mesma faixa de temperatura utilizada neste trabalho. Já Silva (2013) obteve valores de atividade de água para o fruto da aroeira em torno de 0,11, utilizando a temperatura de secagem de 70°C.

Tendo como base os resultados obtidos pelos dois autores supra citados, os valores de atividade de água encontrados neste trabalho estão dentro de um bom padrão para um produto de secagem em camada de espuma, sendo menores do que 0,3 o que dificulta principalmente o crescimento microbiológico onde de acordo com Beuchat (1981) o valor mínimo para o crescimento microbiológico é de 0,6 de atividade de água, o que favorece o crescimento de fungos, e as reações enzimáticas, aumentando a estabilidade do produto.

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente de difusão  $D_L$  foi determinado para os dados experimentais a partir da Equação 2.5; através de uma regressão não-linear desta equação que foi truncada no segundo termo da série. A regressão não-linear foi feita utilizando o método de Gauss-Newton e a equação utilizada na determinação do coeficiente de difusão foi a Equação 4.10.

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \left( e^{-D_L t \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L t \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2} \right) \quad (4.10)$$

Onde o valor de  $l$  é igual a 1,0 cm, que é a espessura da camada de espuma e os valores de  $RU$ , são os dados da razão de umidade experimental. Os valores dos coeficientes de todos os experimentos foram determinados através da Equação 4.10. Os resultados têm como base estatística os valores do coeficiente de determinação e da estimativa do erro padrão e são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados da determinação do coeficiente de difusão.

Experimento	Temperatura (°C)	$D_L$ (m <sup>2</sup> /s) x 10 <sup>9</sup>	R <sup>2</sup>	S
1	50	4,55	0,9168	0,0911
2	50	3,71	0,9127	0,0880
3	70	10,1	0,8993	0,1046
4	70	7,72	0,8879	0,1076
5	50	3,20	0,8955	0,0960
6	50	3,09	0,8982	0,0927
7	70	9,28	0,8980	0,1042
8	70	9,20	0,8964	0,1053
9	60	6,38	0,8989	0,1045
10	60	6,30	0,8924	0,1014
11	60	7,00	0,8768	0,1116

O coeficiente de difusão representa a interação de todas as variáveis que exercem influência sobre a transferência de massa, onde a sua variação observada no processo depende não somente da temperatura empregada em cada secagem, mas também das condições do material como teor inicial de umidade e de suas propriedades físicas (FRANCO, 2015).

Pode ser observado na Tabela 4.6 que os maiores valores para os coeficientes de difusão ocorrem para as maiores temperaturas.

Os valores obtidos são altos que ao serem comparados com outros valores de diferentes materiais obtidos por diferentes métodos de secagem nota-se uma diferença de ordem de pelo menos mil vezes como é no caso de Silva (2013) que obteve valores na casa de  $10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s. Os valores obtidos por Roncheti (2014) ficaram em torno de  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s, são valores referentes a secagem de cenoura em camada de espuma. Franco (2015) que trabalhou com a secagem do Yacon, obteve valores de coeficiente de difusão na ordem de  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, e ambos os autores citados trabalharam na mesma faixa de temperatura utilizada neste trabalho.

A secagem em camada de espuma tem na difusão um método de transporte de massa com altos valores de coeficientes o que favorecem a difusão, além do que com o aumento da temperatura ocorre o aumento desse coeficiente como pode ser verificado na Tabela 4.6.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DE PROTEÍNAS

Os valores obtidos para a proteína do pó do sangue bovino são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores de proteínas obtidos através do método Kjeldahl.

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Proteínas (%)</b>
1	50	88,7
3	70	85,4

Segundo Massaro (2002) o sangue bovino apresenta a quantidade de 16,44% em média de proteína bruta *in natura*, o resultado obtido utilizando a secagem em camada mostra que o pó obtido apresentou uma concentração maior de sangue bovino, concentrando o teor de proteínas e fornecendo um produto mais nutritivo.

Os resultados obtidos para os dois extremos de temperatura, mostram que a secagem a 70 °C não é um fator de risco quando se trata de desnaturação das proteínas do sangue. Estes valores ficaram próximos aos obtidos por Ré (1986) que obteve o sangue em pó através da secagem em leito de jorro e com valores de 87% de proteínas.

Esses valores de proteínas estão dentro de padrões oficiais para a utilização em suplementação alimentar como diz o artigo 294 do RIISPOA, lei de nº 3.748 de 12 de julho de 1993.

## 5 CONCLUSÕES

Utilizar o sangue bovino no processo de secagem em camada de espuma é uma alternativa viável à produção do sangue bovino em pó, cujo tempo de produção médio gira em torno de 3 horas por batelada.

A concentração de Emustab® e o tempo de agitação são fatores que influenciam diretamente nas características físicas da espuma gerada, e ambas as variáveis são estatisticamente significativas em relação às variáveis de resposta estudadas na caracterização, sendo necessária uma análise conjunta para a determinação da estabilidade da espuma obtida.

Para a obtenção de uma espuma estável, deve-se trabalhar com valores mínimos de concentração de Emustab® e tempo de agitação, 3% e 5 min respectivamente, assim a espuma obtida apresentará uma estrutura estável podendo ser levada à estufa para o processo de secagem.

A obtenção do sangue bovino em condição ótima ocorre ao se trabalhar com temperatura de 70 °C, 3% de Emustab e 5 min de agitação.

É possível observar nas curvas de secagem geradas que os dados apresentam ambos os períodos de secagem: taxa constante e taxa decrescente de secagem.

O modelo que apresentou melhor resultado levando em consideração as três temperaturas utilizadas, foi o modelo de Page, sendo considerado o que melhor descreve o processo.

A atividade de água obtida em todos os experimentos apresentam valores abaixo de 0,3, o que significa um bom resultado para um produto que pode apresentar fins alimentícios.

Valores de coeficientes de difusão na ordem de  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, são valores considerados relativamente altos em comparação com outros estudos de materiais em camada de espuma e outros tipos de secagem, onde a faixa de resultados é na faixa de  $1 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s a  $1 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s no geral.

Apenas as amostras que foram secas na temperatura de 70 °C podem ser consideradas como “sangue em pó” já que suas umidades em base úmida ou estão abaixo ou são muito próximas de 8,0 %.

A concentração de proteínas obtida para o pó foi acima da mínima considerada ideal, tendo o pó de sangue um alto teor de proteína pós-secagem, tanto na temperatura de 50 quanto na de 70°C.

## REFERÊNCIAS

- AFZAL, T.M.; ABE, T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 26, p. 137-145, 2000.
- ALFA LAVAL. **SANGUE EM PÓ**. Suécia, p. 1-7, 2007.
- 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. 6, p. 86-99, 2016.
- ARAÚJO, P. P. P.; COSTA, L. P. Impactos ambientais nas atividades de abate de bovinos: um estudo no matadouro público municipal de Caicó-RN. **Revista HOLOS**, 2014.
- ARRUDA, V. C. M. **Tratamento anaeróbio de efluentes gerados em matadouros de bovinos**. Recife, 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- AURICCHIO, A.; COELHO, D. S.; MONTAGNA, F. B.; MARTINS, J. F.; PACHECO, R. C.; PIOVAN, R. J.; NITZ, M. **Sangue bovino em pó**. Instituto Mauá de Tecnologia, 2010.
- 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**, Campina Grande, v. 19, p. 1203-1208, 2015.
- BARRETO, I. M. A. **Caracterização de polpa de pitanga roxa (*Eugenia uniflora*) desidratada em leito de espuma**. Itapetinga, 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2011.
- BEUCHAT, L. R. Microbial stability as affected by water activity. **Cereal Foods World**, v. 26, p. 345-349, 1981.
- BOEIRA, J. B.; STRINGARI, G. B.; LAURINDO, J. B. Estudo da desidratação de pêssegos por tratamento osmótico e secagem. **Boletim de CEPPA**, Curitiba, v. 25, p. 77-90, 2007.
- BRAGA, A. V. U. **Caracterização de atividade de água e cinética de dessorção de água em alimentos**. Campinas, 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- BUTOLO, J.E. **Qualidade de ingredientes na alimentação animal**. Campinas: Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, v. 2, 2002.
- DEMIREL, D.; TURHAN, M. Air-drying behavior of dwarf cavendish and gros-michel banana slices. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 1-11, 2003.
- EL-AOUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M.; KUROSZAWA, L. E.; SIMÕES, M. R.; ANTONIO, G.C.; MURR, F. E. X. Study of shrinkage phenomenon during convective drying of papaya

(*Carica papaya l.*). Em: **Mercosur congress on Chemical Engineering, 2<sup>a</sup> ed.** Rio de Janeiro, UFRJ, 2005.

FALADE, K. O.; OKOCHA, J. O. Foam-mat drying of plantain and cooking banana (*Musa spp*). **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, p. 1173-1180, 2012.

FERNANDES, R. V. B.; QUEIROZ, F.; BOTREL, D. A.; ROCHA, V. V.; SOUZA, V. R.; LIMA, C. F. Estudo da adição de albumina e da temperatura de secagem nas características de polpa de tomate em pó. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, p. 1267-1278, 2014.

FRANCIS, F. J. **Encyclopedia of food science and technology**. 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc. v. 1, p. 2907, 2000.

FRANCO, T. S. **Desidratação osmótica de yacon pelo método de camada de espuma**. Curitiba, 192p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GALDINO, P. O.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; GALDINO, P. O. Drying kinetics of atemoya pulp. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 20, p. 672-677, 2016.

GUIMARAES, M. K. A.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Foam-mat drying kinetics of keitt mango pulp. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, p. 172-180, 2017.

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

LAU, K.; DICKINSON, E. Structural and rheological properties of aerated high sugar systems containing egg albumen. **Journal of Food Science**, v. 69,mp. 232-239, 2004.

LOPES, F. J.; MELLO JR, R. E.; ALVES, G. E.; MENDONÇA, K. S.; SILVA, K. C. R.; CORRÊA, J. L. G. **Ajuste de modelos semiteóricos para predição de cinética de secagem de Yacon (*Smallanthus sonchifolius*)**. Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2015. Disponível em: <<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/enemp2015/SE-610.pdf>>. Acesso em: 12/06/2017.

MARCINKOWSKI, E. A. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja**. Porto Alegre, 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MARINOVA, K. G.; BASHEVA, E. S.; NENOVA, B.; TEMELSKA, M.; MIRAREFI, A. Y.; CAMPBELL, B.; IVANOV, I. B. Physico-chemical factors controlling the foambility and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. **Food Hydrocolloids**, v. 23, p. 1864-1876, 2009.

MARQUES, G. M. R. **Secagem de caldo de cana em leite de espuma e a avaliação sensorial do produto**. Itapetinga, 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.

MARTINS, S. N. **Efeito do sangue bovino utilizado em rações para a alimentação de alevinos de tambaqui (*Colossoma macropomum*)**. Campinas, 117p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, Campinas, 1993.

MASSARO, A. F.; PINTO, L. A. de A.. Enriquecimento proteico de farelo de arroz desengordurado, com sangue bovino, utilizando a técnica de leito de jorro. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 61, p. 77-84, 2002.

MCMINN, W. A. M.. Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose poder. **Journal of food engineering**, v. 72, p. 113-123, 2006.

MELO, K. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, J. De M.; FERNANDÊS, T. K. S.; BEZERRA, M. C. T. Secagem em camada de espuma da polpa do fruto do mandacaru: experimentação e ajustes de modelos matemáticos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 26, p. 10-17, 2013.

MUTHUKUMARAN, A.; RATTI, C.; RAGHAVAN, V. G. S. Foam-mat freeze drying of egg white and mathematical modeling part I Optimization of egg white foam stability. **Drying Technology**, London-UK, v. 26, p. 508-512, 2008.

NICOHELLI, L. M. Sorção de potássio em amostras de solo submetidas à aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 754-760, 2012.

NOGUEIRA, N. N.; COLLI, C.; COZZOLINO, S. M. F. Controle de anemia ferropriva em pré-escolares por meio da fortificação de alimento com concentrado de hemoglobina bovina (estudo preliminar). **Caderno Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 459-465, 1992.

PADILHA, A. L. D. **Isotermas de adsorção de umidade de suplemento alimentício rico em ferro hematínico (sangue bovino em pó). Aceitabilidade de alguns produtos enriquecidos**. Florianópolis, 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

PADILHA, A. L. D.; LOPES, T. J.; QUADRI, M. G. N. Utilização de sangue bovino em pó em produtos de panificação. **Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos**, Campos Mourão/PR, v. 4, p. 47-54, 2013.

PAGE, C. Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers. **Tese de Mestrado**, Purdue University. West Lafayette, 1949.

PARDI, M. C., SANTOS, I. C. SOUZA, E. P., PARDI, H. S. **Ciência higiene e tecnologia da carne**. 2ª ed., Goiânia: Editora da UFG. 1996.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Campinas, 121p, 2007.

PINTO, E. G. **Caracterização da espuma de jenipapo (*Genipa americana* L.) com diferentes aditivos visando à secagem em leite de espuma**. Itapetinga, 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.

RATTI, C.; KUDRA, T.. Drying of foamed biological materials: oportunities and challenges. **Drying Technology**, v. 24, p. 1101-1108, 2006.

Ré, M. I. **Secagem de sangue animal em leite de jorro**. Dissertação, Centro de Ciências e Tecnologia – UFSCar, São Carlos, 1989.

RICHARDSON, J.F.; HARKER, J.H.; BACKHURST, J.R. **Coulson and Richardson's Chemical Engineering – Particle Technology and Separation Processes**, 5<sup>a</sup> ed., vol. 2, 2002.

RIISPOA, lei de nº 3.748, de 12 de julho de 1993. Aprova o Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. **Diário oficial – Estado de Santa Catarina, SC**, 28 de julho de 1993.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos: uma estratégia sequencial de planejamentos**, Campinas, SP, Casa do Pão Editora, 2005.

ROMERO, J. T.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F.; TELIS, V. R. N.; MENEGALLI, F. C. **Secagem de produtos alimentícios**, São José do Rio Preto: UNESP, Pág. 58, 1997.

RONCHETI, E. F. S. **Estudo do processo de secagem em leite de espuma de cenoura, tomate, beterraba e morango**. Alegre, 66p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2014.

SANTOS, A. C. de S. **Definição de parâmetros para a secagem em camada de espuma (foam-mat drying) de sangue bovino**. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

SILVA, A. S.; GURJÃO, K. C. O.; ALMEIDA, F. A. C.; BRUNO, R. L. A.; PEREIRA, W. E. Dehydration of tamarind pulp through the foam-mat drying. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1899-1905, 2008.

SILVA, B. G. **Modelagem e simulação do processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi)**. Campinas, 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SILVA, L. M. M.; SOUZA, F. C.; CASTRO, D. S.; GOMES, J. P.; ALMEIDA, F. A. C. Estudo experimental da secagem de polpa de Achachairu em camada fina. **Gaia Scientia**, v. 9, p. 151-155, 2015.

SOBRAL, P. J. A. **Secagem de sangue bovino incorporado à proteína texturizada de soja, em leite fluidizado e em leite fixo**. Campinas, 183p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP, Campinas, 1987.

SOLER, M. P.; VEIGA, P. G. **Série Publicações Técnicas do Centro de Informação em Alimentos: Sorvetes**. Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, 2001.

SOUSA, F. C.; SILVA, L. M. M.; LEMOS, D. M.; MOREIRA, I. S.; LINS, A. D. F.; CASTRO, D. S.; ROCHA, A. P. T. Secagem de resíduos de *Spondias sp.* em camada fina. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 46, p. 197-202, 2015.

WANG, Z.; NARSIMHAN, G. Evolution of liquid holdup profile in a standing protein stabilized foam. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 280, p. 224-233, 2004.

ZURITZ, C. A. **Estudos sobre a desidratação de suco de uva pelo processo de secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*)**. Campinas, 128p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1976.

**APÊNDICE A** – Dados da ANOVA realizada para a variável: Umidade final em base seca.

Fontes de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Teste F F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>	Teste
Regressão	0,026851	1	0,02685100	136,83975	10,12796	O modelo é Significativo
Resíduo (erro)	0,001766	9	0,00019622			
Falta de Ajuste	0,001480	7	0,00021143	1,47852	18,51282	O modelo não apresenta falta de ajuste
Erro Puro	0,000286	2	0,00014300			
<b>Total</b>	<b>0,028617</b>	<b>10</b>				
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,938288</b>					

Dados do ANOVA		Parâmetros	
SQ <sub>Total</sub>	0,0286170	p ==>>>>	<b>2</b>
SQ <sub>resíduo</sub>	0,0017660	n ==>>>>	<b>11</b>
SQ <sub>faltadeajuste</sub>	0,0014800	m ==>>>>	<b>9</b>
SQ <sub>erropuro</sub>	0,0002860		
		F <sub>Tab 95%, GLr, GLr</sub> ==>>>>	<b>10,127964</b>
		F <sub>Tab 95%, GLfa, GLep</sub> ==>>>>	<b>18,512821</b>

**APÊNDICE B** – Dados da ANOVA realizada para a variável: Tempo de secagem.

Fontes de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Teste F F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>	Teste
Regressão	79796,88	1	79796,88000000	43,72206	10,12796	O modelo é Significativo
Resíduo (erro)	16425,85	9	1825,09444444			
Falta de Ajuste	14625,85	7	2089,40714286	2,32156	18,51282	O modelo não apresenta falta de ajuste
Erro Puro	1800,00	2	900,00000000			
<b>Total</b>	<b>96222,73</b>	<b>10</b>				
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,829293</b>					

Dados do ANOVA		Parâmetros	
SQ <sub>Total</sub>	96222,73	p ==>>>>	<b>2</b>
SQ <sub>resíduo</sub>	16425,85	n ==>>>>	<b>11</b>
SQ <sub>faltadeajuste</sub>	14625,85	m ==>>>>	<b>9</b>
SQ <sub>erropuro</sub>	1800,0		
		F <sub>Tab 95%, GLr, GLr</sub> ==>>>>	<b>10,127964</b>
		F <sub>Tab 95%, GLfa, GLep</sub> ==>>>>	<b>18,512821</b>

**ANEXO A** – Artigo 294 do RIISPOA, decreto de lei nº 3.748, do dia 12 de Julho de 1993.

Em seu artigo 294 e seus parágrafos primeiro e segundo diz que:

*“Sangue em pó” é o subproduto industrial obtido pela desidratação do sangue por processos especiais.*

*Parágrafo 1º:*

*Permite-se, quando necessário, a adição de anticoagulantes, mediante aprovação prévia do S.S.A.*

*Parágrafo 2º:*

*O subproduto referido no presente artigo deve conter no mínimo 85% (oitenta e cinco por cento) de proteína e no máximo 8% (oito por cento) de umidade.”*