



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química



TESE DE DOUTORADO

SECAGEM DA AMEIXA PELO MÉTODO DE CAMADA DE ESPUMA: OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS E CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

Cinthia Meirelly de Araújo Elpídio

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira

Natal/RN

Março/2021

Cinthia Meirelly de Araújo Elpídio

**SECAGEM DA AMEIXA PELO MÉTODO DE
CAMADA DE ESPUMA: OTIMIZAÇÃO DOS
PARÂMETROS E CARACTERIZAÇÃO DO
PRODUTO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutora em Engenharia Química, sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros e coorientação do Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira.

Natal/RN

Março/2021

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Biblioteca Central Zila Mamede.
Setor de Informação e Referência.

Elpídio, Cinthia Meirelly de Araújo.

Secagem de ameixa pelo método de camada de espuma: otimização dos parâmetros e caracterização do produto / Cinthia Meirelly de Araújo Elpídio. – 2021.

174 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal, RN, 2021.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros.

Coorientador: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira.

1. Condutividade térmica – Tese. 2. Prunus Doméstica L. — Tese. 3. Propriedades físico-química – Tese. 4. Compostos bioativos – Tese. I. Medeiros, Maria de Fátima Dantas de. II. Oliveira, Jackson Araújo de. III. Título.
RN/UF/ CDU 664.8/9

Elaborado por Kalline Bezerra da Silva - CRB/15 - 327

ELPIDIO, Cinthia Meirelly de Araújo – Secagem da ameixa pelo método de camada de espuma: otimização dos parâmetros e caracterização do produto. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia Química. Linha de pesquisa: Fenômenos de transporte e sistemas particulados. Natal/RN, Brasil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira

Resumo: A ameixa é uma fruta sazonal com baixa durabilidade após a colheita, sendo necessária a aplicação de técnicas que prolonguem a vida útil deste alimento. Dentre os métodos que podem ser aplicados está a secagem em camada de espuma (*foam mat*) que consiste na transformação de líquidos ou semilíquidos em uma espuma estável a partir da adição de um agente espumante e aplicação de agitação para que haja a incorporação de ar. Neste trabalho, a espuma de ameixa foi produzida a partir da adição de albumina de ovo e as secagens foram realizadas em estufa de recirculação de ar com velocidade de 2 m/s. O estudo da secagem da ameixa em camada de espuma foi dividido em etapas, cuja primeira parte consiste na investigação dos efeitos das variáveis de processo, tempo de batimento e concentração de albumina, sobre as propriedades físicas, térmicas e tempo de secagem com o intuito de otimizar as condições operacionais para a produção da espuma de ameixa, cujos valores encontrados foram 3% de concentração de albumina e 12 minutos de tempo de batimento. Na etapa seguinte, foi avaliada a influência da temperatura e da espessura da camada de espuma sobre a umidade, atividade de água e tempo de secagem da espuma de ameixa com o objetivo de definir a melhor condição operacional para secagem desta fruta, sendo observado que a maior temperatura e a menor espessura da camada de espuma são mais adequadas ao processo, visto que forneciam os melhores resultados para a umidade do pó (2,690 g de água/100g de pó seco), atividade de água (0,245), tempo de secagem (70 minutos) e taxa de secagem média (0,0631 g água/g pó seco/min). A última fase deste trabalho investigou a influência da temperatura sobre as propriedades físico-químicas, compostos bioativos e atividade antioxidante e realizou uma comparação dos pós obtidos por camada de espuma a quatro temperaturas com o pó obtido por liofilização, uma vez que este último é amplamente conhecido como o método capaz de preservar as características originais da fruta. Os experimentos foram realizados utilizando a espuma na condição de processo otimizada anteriormente (3% de albumina de ovo na formulação, 12 minutos de batimento e 0,8 cm de espessura de camada) e quatro temperaturas de secagem: 50, 60, 70 e 80 °C. Para a liofilização, foi utilizada cerca de 280 gramas de polpa de ameixa pura, sem adição de albumina de ovo (não foi espumada). A análise dos pós

produzidos mostrou que a temperatura mais elevada (80 °C) forneceu um produto com baixa coesão entre as partículas (1,153) e boa fluidez (13,235%), além de baixa densidade absoluta (0,637 g/cm³), características importantes para materiais particulados. Todos os pós apresentaram boa solubilidade no intervalo de 75,737 e 76,842 g/100 g e baixa atividade de água (0,245 a 0,386). Os compostos fenólicos não foram impactados pelas condições de processo, a atividade antioxidante foi favorecida pela temperatura, mas a quantidade de ácido ascórbico e carotenoides foi bastante reduzida pela ação desta variável. O pó liofilizado se apresentou mais higroscópico (33,410 g água/100 g de sólido seco), todavia com muito boa fluidez (11,944%) e baixa coesão entre as partículas (1,136). O processo se mostrou bastante favorável para a conservação dos compostos fenólicos (221,820 mg equivalente de ácido gálico/100 g da amostra) e atividade antioxidante. Com base nos resultados e tendo em vista que o processo de liofilização é oneroso, a secagem em camada de espuma mostra-se uma alternativa viável e de baixo custo para prolongar e aumentar a disponibilidade da ameixa no mercado. Este estudo mostrou que as condições de operação que forneceram os melhores resultados tanto para o processo de secagem quanto para a qualidade do pó da ameixa foram a espessura da camada de espuma a 0,8 cm e a temperatura de 80 °C.

Palavras-chave: *Prunus domestica* L., *foam mat*, condutividade térmica, coesão entre partículas, propriedades físico-químicas, compostos bioativos.

Cynthia Meirelly de Araújo Elpídio

Secagem da ameixa pelo método de camada de espuma

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Química.

Aprovado (a) em ____/____/____

Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros
Orientadora – UFRN

Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira
Coorientador – UFRN

Prof.^a Dr.^a Kátia Cristina Borges
Membro Interno – UFRN

Prof. Dr. Francisco Canindé de Sousa Júnior
Membro Interno – UFRN

Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida
Membro Externo – UFCG

Prof.^a Dr.^a Josilene de Assis Cavalcante
Membro Externo – UFPB

ELPIDIO, Cinthia Meirelly de Araújo – Drying of the plum by the foam mat method: optimization of parameters and product characterization. Doctorate Thesis. UFRN, Graduate Program in Chemical Engineering. Concentration area: Chemical Engineering. Research line: Transport Phenomena and Particulate Systems. Natal / RN, Brazil.

Main supervisor: Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Dantas de Medeiros

Co-supervisor: Prof. Dr. Jackson Araújo de Oliveira

Abstract: Plum is a seasonal fruit with low durability after harvest, requiring the application of techniques that prolong the shelf life of this food. Among the methods that can be applied is the drying in foam mat that consists of the transformation of liquids or semi-liquids into a stable foam from the addition of a foaming agent and application of agitation so that there is the incorporation of air. In this work, the plum foam was produced from the addition of egg albumin and the drying was carried out in an air recirculation oven with a speed of 2 m/s. The study of the drying of the plum in a foam layer was divided into stages, the first part of which is the investigation of the effects of the process variables, whipping time and albumin concentration, on the physical, thermal properties and drying time in order to optimize the operational conditions for the production of plum foam, whose values found were 3% albumin concentration and 12 minutes of whipping time. In the next step, the influence of temperature and foam mat thickness on the moisture, water activity and drying time of the plum foam was evaluated in order to define the best operational condition for drying this fruit, being observed that the higher temperature and less foam mat thickness are more suitable for the process, since they provided the best results for powder moisture (2.690 g water/100 g dry powder), water activity (0.245), drying time (70 minutes) and average drying rate (0.0631 g water/g dry powder/min). The last phase of this work investigated the influence of temperature on the physical-chemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity and performed a comparison of the powders obtained by foam mat at four temperatures with the powder obtained by freeze drying, since the latter is widely used. known as the method capable of preserving the original characteristics of the fruit. The experiments were carried out using the foam in the previously optimized process condition (3% egg albumin in the formulation, 12 minutes of whipping and 0.8 cm layer thickness) and four drying temperatures: 50, 60, 70 and 80 ° C. For lyophilization, about 280 grams of pure plum pulp was used, without the addition of egg albumin (it was not foamed). The analysis of the produced powders showed that the higher temperature (80 ° C) provided a product with low cohesion between the particles (1.153) and good fluidity (13.235%), in addition to low absolute density (0.637 g/cm³), important

characteristics for particulate materials. All powders showed good solubility in the range of 75.737 and 76.842 g/100 g and low water activity (0.245 to 0.386). The phenolic compounds were not impacted by the process conditions, the antioxidant activity was favored by the temperature, but the amount of ascorbic acid and carotenoids was greatly reduced by the action of this variable. The lyophilized powder was more hygroscopic (33.410 g water/100 g dry solid), however with very good fluidity (11.944%) and low cohesion between the particles (1.136). The process proved to be very favorable for the conservation of phenolic compounds (221.820 mg gallic acid equivalent/100 g of the sample) and antioxidant activity. Based on the results and bearing in mind that the lyophilization process is costly, drying in a foam layer proves to be a viable and low-cost alternative to prolong and increase the availability of the plum on the market. This study showed that the operating conditions that provided the best results for both the drying process and the quality of the plum powder were the thickness of the foam layer at 0.8 cm and the temperature of 80 °C.

Keywords: *Prunus domestica* L., foam mat, thermal conductivity, physicochemical properties, cohesion between particles, bioactive compounds.

Um fuxico arretado

Sem perder meu ponto de vista.
Até onde minha vista alcançou.
E a mente não cansou.
Confesso o trabalho me inspirou.
Fazendo uma comparação.
Até digo ele é tipo um fuxico.
Uma colcha de retalhos.
Bem costurado e alinhavado.
Sem retirar o mérito do trabalho.
Pois, quando um fuxico é costurado de qualquer jeito.
Você logo percebe os erros e defeitos.
Fazia muito tempo.
Eu já nem lembro.
Que eu teria lido.
Um trabalho tão bonito.
E tamanha profundidade.
Que na minha insanidade.
A minha ansiedade.
Tomou conta da minha liberdade.
Confesso em versos.
Fiquei mesmo abestado.
Este fuxico é mesmo arretado.

(Almeida, M. M. de)

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me manter perseverante mesmo diante das dificuldades.

Aos meus amados pais, Marluce e Canindé, os doutores da minha vida, eu agradeço por todos os valiosos ensinamentos e valores passados, por sempre acreditarem em mim e por todo o amor. Muito obrigada! Amo vocês!

À minha maravilhosa irmã, Camilla, pelo companheirismo em todos os momentos sejam eles bons ou não, pelo carinho (apesar de você não gostar de tantos abraços e beijos) e pela amizade de sempre. Amo você!

Aos meus orientadores, professora Fátima e professor Jackson, que em um momento de grande dificuldade, no início do meu ingresso no doutorado, aceitaram ser meus orientadores. Muito obrigada pelos ensinamentos e confiança durante a execução desta pesquisa.

Aos professores que aceitaram compor a minha banca de doutorado.

Às minhas amigas e companheiras de doutorado, Camilla Emanuelle, Suziane Cristina, Juliana Leão e Thayse Nayane, pelos conhecimentos repassados, pelo apoio nos instantes de desânimo e pelos vários momentos de descontração.

À minha única bolsista de iniciação científica, Aimée Tavares, a quem carinhosamente chamava de Melhor Bolsista, pela excelente convivência juntas, pelo compromisso com os experimentos e por ser essa amiga especial que levarei para toda a vida.

À minha querida Amanda, a quem chamo de Amandinha, por ser essa pessoa especial e amiga. Certamente uma das pessoas maravilhosas que este doutorado me deu!

À querida Eusamar Coelho, Mazinha, por ter sido alguém sempre disponível e por me ajudar em um momento de tribulação no início do doutorado.

Ao incrível Carlos Eduardo Padilha, para mim Carlitos, que além de ter sido essencial (lá atrás) durante o meu mestrado, tornou-se uma pessoa muito querida para mim ao longo desses anos, não só pelas conversas científicas, mas também pela amizade, generosidade e apoio sempre demonstrados. Conte comigo sempre que precisar, meu amigo!

Ao meu querido Francisco Canindé de Sousa Júnior pela amizade, generosidade e apoio de sempre, tanto no mestrado quanto no doutorado. Você é especial!

Ao Laboratório de Bromatologia do Departamento de Farmácia da UFRN pela realização das análises de composição, determinação de compostos fenólicos, atividade antioxidante total, atividade quelante e sequestro dos radicais DPPH e ABTS dos pós de ameixa produzidos neste trabalho.

Ao professor Marcello Maia de Almeida pelo texto maravilhoso e exclusivo (Um fuxico arretado), que ele fez sobre este trabalho e pela permissão concedida para que eu pudesse colocá-lo nesta tese com o intuito de que todos também possam apreciá-lo, já que agora eles (texto e tese) são inseparáveis. Muito obrigada!

Aos meus maravilhosos amigos de todas as horas, Carol, Deyse, Ederson e Mayara pela amizade, parceria e paciência ao longo desses anos!

A todos os colegas do LEB (Laboratório de Engenharia Bioquímica) que sempre me acolheram da melhor forma possível, mesmo eu não pertencendo mais a este laboratório.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Alimentos da UFRN que me receberam com muita generosidade e parceria.

A UFRN, PPGEQ e Capes por viabilizarem esta pesquisa.

Sumário

Lista de figuras.....	i
Lista de tabelas.....	iv
Lista de abreviaturas e siglas.....	v
1 Introdução.....	20
2 Revisão bibliográfica.....	26
2.1 Aspectos gerais da ameixa.....	26
2.2 Anatomia do fruto.....	28
2.3 Emulsificantes.....	29
2.3.1 Albumina de ovo.....	30
2.4 Secagem.....	31
2.4.1 Curvas de secagem e umidade de equilíbrio.....	32
2.4.2 Secagem em camada de espuma - <i>foam-mat drying</i>	34
2.4.3 Liofilização.....	38
2.5 Modelagem do processo e ajustes de modelos matemáticos.....	39
2.6 Transferência de calor e massa.....	41
2.7 Produtos desidratados em pó.....	47
2.8 Estresse oxidativo e potencial antioxidante.....	48
2.8.1 Compostos fenólicos.....	50
2.8.2 Ácido ascórbico.....	50
2.8.3 Carotenoides.....	52
3 Materiais e métodos.....	55
3.1 Materiais.....	55
3.2 Planejamento experimental.....	55
3.3 Preparação da espuma de ameixa.....	59
3.4 Determinação das propriedades da espuma.....	60
3.4.1 Densidade da espuma.....	60
3.4.2 Expansão da espuma.....	60
3.4.3 Porosidade da espuma.....	60
3.4.4 Volume drenado.....	61
3.4.5 Determinação das propriedades térmicas da espuma.....	61
3.5 Secagem em camada de espuma.....	62

3.5.1	Cinética de secagem das espumas e taxa de secagem	63
3.5.2	Difusividade efetiva e energia de ativação	63
3.6	Liofilização	64
3.7	Ajuste de modelos matemáticos.....	65
3.8	Coefficientes de transporte e números adimensionais de transferência de calor e massa 67	
3.9	Análise estatística.....	68
3.9.1	Correlação entre variáveis	69
3.9.2	Função conveniência ou método <i>desirability</i>	69
3.10	Análises das propriedades do pó.....	70
3.10.1	Densidade aparente e compactada.....	70
3.10.2	Densidade absoluta.....	70
3.10.3	Fluidez e coesão do pó.....	71
3.10.4	Acidez total titulável.....	72
3.10.5	Atividade de água	73
3.10.6	Higroscopicidade	73
3.10.7	Umidade.....	74
3.10.8	Solubilidade	74
3.10.9	Proteína.....	74
3.10.10	Lipídeos.....	75
3.10.11	Cinzas.....	76
3.10.12	Fibra bruta.....	76
3.10.13	Carboidratos.....	77
3.10.14	Determinação dos compostos fenólicos totais	77
3.10.15	Determinação do ácido ascórbico (AA).....	78
3.10.16	Carotenoides	79
3.10.17	Preparação dos extratos.....	79
3.10.18	Sequestro do radical DPPH.....	79
3.10.19	Sequestro do radical ABTS.....	80
3.10.20	Atividade antioxidante total.....	80
3.10.21	Atividade quelante	81
3.10.22	Análise estatística dos resultados das análises	81
4	Resultados e discussão	83
4.1	Efeito do tempo de batimento e concentração de albumina de ovo nas propriedades físicas, térmicas e de secagem da espuma de ameixa	83

4.1.1	Influência da concentração de albumina de ovo e do tempo de batimento nas propriedades físicas e térmicas da espuma de ameixa	83
4.1.2	Secagem das espumas e difusividade efetiva	90
4.1.3	Análise estatística	95
4.1.4	Função de conveniência ou método <i>desirability</i>	99
4.2	Secagem da espuma otimizada em condições variadas de temperatura e espessura da camada	100
4.2.1	Características da secagem	101
4.2.2	Difusividade efetiva e energia de ativação	105
4.2.3	Umidade do pó e atividade de água	109
4.2.4	Análise estatística	111
4.2.5	Análise dos fenômenos de transferência de calor e massa	114
4.2.6	Ajuste de modelos matemáticos	117
4.2.7	Função conveniência ou método <i>desirability</i>	120
4.3	Estudo da influência da temperatura nas propriedades físico-químicas e compostos bioativos dos pós de ameixa	121
4.3.1	Secagem das espumas.....	122
4.3.2	Densidades e parâmetros de fluidez dos pós	124
4.3.3	Propriedades físico-químicas do pó.....	126
4.3.4	Compostos bioativos.....	132
5	Conclusão.....	140
	Referências bibliográficas.....	143

Lista de figuras

Figura 2.1 - Distribuição mundial da produção de ameixa (<i>Prunus</i>).....	27
Figura 2.2 - Morfologia da ameixa.....	28
Figura 2.3 - Estrutura típica dos emulsificantes. Fonte: Ramos (2013).	29
Figura 2.4 - Curva típica de taxa de secagem sob condições constantes. Fonte: Adaptado de Jangam <i>et al.</i> (2010).	33
Figura 2.5 - Gráfico de Umidade de Equilíbrio. Fonte: Keey (1992).	34
Figura 2.6 - Fatores que influenciam o número de Nusselt. Fonte: autora.....	43
Figura 2.7 - Fatores que influenciam o número de Sherwood. Fonte: autora.	44
Figura 2.8 - Fatores de influenciam o número de Schmidt. Fonte: autora.	45
Figura 2.9 - Reação de oxidação do ácido ascórbico. Fonte: Rosa et al. (2007).....	51
Figura 3.1 - Preparação da polpa de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.	55
Figura 3.2 - Preparação da espuma de ameixa. (A) Polpa de ameixa pura; (B) Polpa de ameixa + albumina de ovo; (C) Espuma de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.	59
Figura 3.3 - Análise de volume drenado da espuma de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.	61
Figura 3.4 - Pó de ameixa obtido por secagem em camada de espuma. Fonte: Arquivo pessoal.	62
Figura 3.5 - Liofilização. (A) Liofilizador utilizado na pesquisa; (B) Polpa de ameixa após a liofilização. Fonte: (A) Manual (2012) e (B) Arquivo pessoal.	65
Figura 3.6 - Análise do teor de ácido ascórbico. (A) Amostras após a centrifugação; (B) Etapas da titulação – erlenmeyer com coloração azul: antes de iniciar a titulação, erlenmeyer com coloração rosa: durante a titulação; (C) Ponto final da titulação. Fonte: Arquivo pessoal.	78
Figura 4.1 - (A1) Densidade da espuma <i>versus</i> tempo de batimento; (A2) Densidade da espuma <i>versus</i> concentração de albumina; (B1) Expansão da espuma <i>versus</i> tempo de batimento; (B2) Expansão da espuma <i>versus</i> concentração de albumina; (C1) Porosidade da espuma <i>versus</i> tempo de batimento; (C2) Porosidade da espuma <i>versus</i> concentração de albumina.....	84
Figura 4.2 - Correlação da condutividade térmica com a densidade e a porosidade da espuma	88
Figura 4.3 – Avaliação da condutividade térmica da espuma com o tempo de batimento e a concentração de albumina	89

Figura 4.4 - Avaliação da capacidade térmica da espuma com o tempo de batimento e a concentração de albumina	90
Figura 4.5 - Curvas de secagem – razão de umidade versus tempo de secagem para diferentes concentrações de albumina. (A) 3%; (B) 5%; (C) 7%	91
Figura 4.6 - Correlação do tempo de secagem com a condutividade térmica e a densidade da espuma.....	93
Figura 4.7 - Correlação da difusividade efetiva com a condutividade térmica da espuma (A1), densidade da espuma e tempo de secagem (A2)	95
Figura 4.8 - Gráficos de Pareto dos efeitos das variáveis de processo nas espumas de ameixa no intervalo de confiança de 95%: (A) Densidade aparente da espuma (g/cm^3); (B) Condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); (C) Capacidade térmica ($\text{MJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$); (D) Tempo de secagem (min).....	96
Figura 4.9 - Valores preditos versus valores observados. (A) Condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); (B) Tempo de secagem (minutos)	98
Figura 4.10 - Valores preditos pela função conveniência (método desirability) para concentração e tempo de batimento.....	100
Figura 4.11 - Razão de umidade versus tempo de secagem para a espuma de ameixa a diferentes espessuras de camada e temperaturas do ar (A) $60\text{ }^\circ\text{C}$; (B) $70\text{ }^\circ\text{C}$; (C) $80\text{ }^\circ\text{C}$	102
Figura 4.12 - Taxa de secagem versus tempo de secagem para a espuma de ameixa a diferentes espessuras de camada e temperaturas do ar (A) $60\text{ }^\circ\text{C}$; (B) $70\text{ }^\circ\text{C}$; (C) $80\text{ }^\circ\text{C}$	104
Figura 4.13 – Influência da temperatura do ar na difusividade efetiva	109
Figura 4.14 - Gráficos de Pareto dos efeitos das variáveis de processo no intervalo de confiança de 95%: (A) Umidade do pó (g de água/100 g de pó seco); (B) Atividade de água; (C) Tempo de secagem (min); (D) Taxa média de secagem ((g água/g pó seco)/min).	112
Figura 4.15 – Valores preditos versus valores observados. (A) Umidade do pó; (B) Atividade de água; (C) Tempo de secagem; (D) Taxa média de secagem.....	114
Figura 4.16 - Valores preditos versus observados para o modelo de Distribuição de Weibull	120
Figura 4.17 - Valores preditos pelo método desirability para temperatura e espessura	121
Figura 4.18 - Razão de umidade versus tempo de secagem	122
Figura 4.19 - Taxa de secagem versus tempo de secagem	123

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Níveis das variáveis independentes (concentração de albumina e tempo de batimento).....	56
Tabela 3.2 - Planejamento experimental fatorial completo 3 ² . Variáveis independentes: tempo de batimento e concentração de albumina.....	57
Tabela 3.3 - Níveis das variáveis independentes (espessura da camada de espuma e temperatura do ar de secagem).....	58
Tabela 3.4 - Planejamento experimental fatorial completo 3 ² . Variáveis independentes: espessura da camada de espuma e temperatura do ar de secagem.....	58
Tabela 3.5 - Modelos matemáticos para secagem em camada delgada.....	66
Tabela 3.6 - Classificação de fluidez e coesão do pó baseada no índice de Carr e na razão de Hausner.....	72
Tabela 3.7 - Classificação dos pós quanto à higroscopicidade.....	73
Tabela 4.1 - Condutividade e capacidade térmica das espumas.....	87
Tabela 4.2 - Tempo de secagem e difusividade efetiva.....	94
Tabela 4.3 - Análise de regressão das variáveis dependentes.....	97
Tabela 4.4 – Dados sobre a secagem da espuma de ameixa.....	108
Tabela 4.5 – Valores da umidade e atividade de água dos pós produzidos.....	111
Tabela 4.6 – Análise de regressão das variáveis dependentes.....	113
Tabela 4.7 – Coeficientes de transporte e números adimensionais de transferência calor e massa.....	116
Tabela 4.8 - Resultados estatísticos para os modelos aplicados a diferentes condições de secagem da espuma de ameixa.....	118
Tabela 4.9 - Parâmetros do modelo de Distribuição de Weibull aplicado aos dados experimentais.....	119
Tabela 4.10 - Dados sobre a secagem da espuma de ameixa a diferentes temperaturas.....	124
Tabela 4.11 - Propriedades de fluidez do pó.....	125
Tabela 4.12 - Propriedades físico-químicas dos pós.....	128
Tabela 4.13 - Compostos bioativos e atividades antioxidantes presentes nos pós de ameixa.....	135

Lista de abreviaturas e siglas

- AA – Ácido ascórbico
- AAT – Atividade antioxidante
- ABTS - 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolína-6-ácido sulfônico)
- ATT – Acidez total titulável
- aw – Atividade de água
- Bi – número de Biot
- Bi_m – Número de Biot para transferência de massa
- CFT – Compostos fenólicos totais
- C_p – Capacidade térmica da espuma
- CT – Condutividade térmica
- d – Comprimento característico
- D_{AB} – Coeficiente de difusividade de massa binário
- D_{eff} – Difusividade efetiva de massa
- DPPH – 2,2-difenil-1-picrilhidrazil
- E_a – Energia de ativação
- EAG – Equivalente de ácido gálico
- F_{calc} – Valor do F calculado
- F_{Tab} – valor do F tabelado
- h – Coeficiente de transferência de calor
- h_m – Coeficiente de transferência de massa
- IC – Índice de Carr
- k – Condutividade térmica da espuma
- Nu – Número de Nusselt
- Pr – Número de Prandtl
- QM_{erro} - Quadrado médio do puro erro
- QM_{falta} – Quadrado médio da falta de ajuste
- QM_R – Quadrado médio da regressão
- QM_r – Quadrado médio residual
- Re – Número de Reynolds
- RH – Razão de Hausner
- RQMR - Raiz do quadrado médio residual

RU – Razão de umidade
Sc – Número de Schmidt
Sh – Número de Sherwood
T₀ – Temperatura inicial
TB – Tempo de batimento
T_{bu} – Temperatura de bulbo úmido
TEAC - *Trolox Equivalent Antioxidant Capacity*
TS – Tempo de secagem
U_{eq} – Umidade de equilíbrio
X – Concentração de albumina de ovo
μ – Viscosidade dinâmica
ρ_a – densidade aparente do pó
ρ_{abs} – densidade absoluta do pó
ρ_c – densidade compactada do pó
ρ_e – densidade da espuma
ρ_p – densidade da polpa de ameixa
φ – Porosidade da espuma
χ² - Qui-quadrado reduzido

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

O Brasil é um país de grande dimensão territorial e com condições climáticas favoráveis ao cultivo de uma grande variedade de frutas. Entre as frutas, a ameixa tem sido amplamente produzida no sudeste e sul do país onde o clima é mais ameno. A área cultivada desta fruta é de 4.200 hectares e a produção anual alcança 40 mil toneladas (Silveira, 2017). Entretanto, como a produção nacional ainda não consegue suprir a demanda do mercado interno, ainda há a necessidade de importar o produto de outros países como Espanha, Chile, Portugal, Argentina, Itália e Uruguai (CEAGESP, 2019). Existem inúmeras variedades de ameixas conhecidas. As espécies mais cultivadas em território brasileiro são *Prunus salicina* Lindl. e *Prunus domestica* L. (Castro *et al.*, 2008; Schneider & Azevedo Filho, 2014).

Nos últimos anos, diversos estudos têm associado o consumo regular de frutas e vegetais à redução da incidência de doenças degenerativas, graças ao seu alto potencial antioxidante (Dubey *et al.*, 2015; Leontowicz *et al.*, 2016; Salazar *et al.*, 2018; Kamal *et al.*, 2019; Domin *et al.*, 2020). Os efeitos adversos do processo oxidativo na saúde humana tornaram-se um problema sério. As espécies reativas de oxigênio (ERO) são geradas durante o metabolismo celular e podem ser inativadas pela ação de mecanismos existentes no próprio organismo humano. No entanto em situações de desequilíbrio, ocorre o que se chama de estresse oxidativo. Este desequilíbrio pode levar a lesão celular e problemas de saúde (Miletić *et al.*, 2013). A falta de antioxidantes, que podem inibir ou anular a ação dos radicais livres, favorece o desenvolvimento de doenças degenerativas, incluindo as doenças cardiovasculares, doenças neurodegenerativas, doença de Alzheimer e doenças inflamatórias (Di Matteo & Esposito, 2003; Ioannou *et al.*, 2011; Milala *et al.*, 2013). Com o aumento na ingestão desses alimentos, estudos epidemiológicos têm demonstrado os efeitos benéficos do consumo de frutas e vegetais com elevado teor de compostos fenólicos na prevenção de problemas cardio e cerebrovasculares e mortalidade por câncer (Vangdal *et al.*, 2017). Com isso, uma alternativa é suplementar a dieta com compostos antioxidantes que estão contidos em fontes naturais, como frutas e vegetais.

Nesse contexto estão inseridas as ameixas, frutos ricos em compostos bioativos ou fitoquímicos, tais como: vitaminas (A, C e E), antocianinas e outros compostos fenólicos que são componentes caracterizados por apresentar uma atividade antioxidante (Arion *et al.*, 2014). As ameixas são uma boa fonte de antioxidantes naturais e podem fornecer benefícios para a

saúde dos consumidores, uma vez que estes frutos influenciam movimentos peristálticos, retardam a absorção de hidratos de carbono, melhoram a sensação de saciedade, reduzem os níveis de colesterol total, triglicéridos no sangue e concentrações de homocisteína, além de ter uma ação protetora sobre os vasos sanguíneos (Rupasinghe *et al.*, 2006).

Como exposto acima, o consumo da ameixa proporciona vários benefícios ao seres humanos e, como as pessoas tem buscado atualmente a inserção de alimentos saudáveis em sua rotina, a disponibilidade de opções no mercado com esta característica se faz cada vez mais necessária. No entanto, esse fruto tem uma estação de colheita curta e um tempo limitado de armazenamento sob condições ambiente e de refrigeração. Um exemplo disto é a ameixa japonesa, que é mantida a 20 ou 21 °C no local de venda e permanece em boas condições por cinco dias; entre 22 e 29 °C somente por dois ou três dias (Castro *et al.*, 1994). A baixa durabilidade e sazonalidade desta fruta dificulta o consumidor a adquiri-la no mercado em boas condições e a um preço mais baixo. Nesse sentido, a industrialização da ameixa é necessária para obter um produto com maior estabilidade e diversidade de consumo para aumentar sua comercialização (Muñoz-López *et al.*, 2018).

Frutas e legumes frescos não podem ser armazenados por longo período em virtude do seu alto teor de umidade (Kowalski & Mierzwa, 2011). A remoção de umidade com consequente redução da atividade de água é uma das alternativas mais viáveis para prolongar a vida útil dos alimentos. Com isso, a aplicação de processos que permitam prolongar a vida útil desses alimentos torna-se fundamental. Técnicas de preservação podem converter alimentos perecíveis em produtos estabilizados, permitindo tempo de armazenamento e reduzindo as perdas pós-colheita (Ng & Sulaiman, 2018). Diferentes técnicas para a secagem da ameixa são relatadas na literatura, como a secagem em forno convencional estudada por Vangdal *et al.* (2017), a secagem convectiva relatada por Michalska *et al.* (2016), a secagem vertical em bandeja e liofilização por Muñoz-Lopez *et al.* (2018).

Neste estudo, foi aplicado o processo de secagem em camada de espuma. Este método de desidratação transforma alimentos líquidos e semilíquidos em uma espuma estável através da adição de agentes com propriedades emulsificantes e espessantes (Soares *et al.*, 2001). Neste trabalho, a albumina de ovo foi escolhida como agente espumante por ser de origem natural e enriquecer o produto final em proteínas. Nos últimos anos, a secagem em camada de espuma tem ganhado reconhecimento como uma técnica de secagem eficaz e de baixo custo. A porosidade da espuma e a maior relação área superficial-volume proporcionam altas taxas de

transferência de calor e massa nessa técnica, reduzindo o tempo do processo e melhorando a qualidade do produto seco que se apresenta poroso e facilmente reidratável (Dehghannya *et al.*, 2019).

A qualidade de um alimento pode ser avaliada pelas suas propriedades físico-químicas, nutricionais e funcionais, além da sua composição. As quantidades ou proporções dos componentes no alimento caracterizam a composição. Já a disponibilidade de nutrientes essenciais e ausência de substâncias tóxicas definem seu caráter nutricional e as propriedades funcionais são determinadas pela finalidade a qual se destina. No estudo de produtos secos a qualidade do produto final pode ser expressa sob aspectos relativos às propriedades físicas, químicas e sensoriais, as quais podem ser usadas como indicadores de qualidade, visto que os processos de secagem podem afetar positiva ou negativamente a qualidade do pó da fruta. Nesse sentido, várias análises como, por exemplo, solubilidade, higroscopicidade, atividade de água, composição, compostos bioativos, dentre outras foram realizadas a fim de identificar esse impacto no pó de ameixa produzido neste estudo.

O objetivo desta pesquisa é a obtenção de ameixa em pó a partir da secagem em camada de espuma, a fim de proporcionar uma forma de incluir esta fruta na alimentação como um composto em pó suplementar com alto valor agregado, contribuindo de maneira prática para o aumento da ingestão de nutrientes no cotidiano. O trabalho foi dividido em cinco capítulos: introdução, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusão e referências bibliográficas apresentadas após o capítulo cinco. Vale salientar que o capítulo quatro, resultados e discussão, foi subdividido em três etapas interligadas e que se complementam: a primeira investiga o efeito do tempo de batimento e concentração de albumina de ovo nas propriedades físicas, térmicas e de secagem da espuma de ameixa; a segunda, avalia a secagem da espuma otimizada em condições variadas de temperatura e espessura e, na última, foi realizado um estudo da influência da temperatura nas propriedades físico-químicas e compostos bioativos do pó de ameixa, além de serem analisados os impactos da secagem no alimento, através de uma comparação entre o produto obtido pelo método de secagem em camada de espuma com o pó de ameixa liofilizado, uma vez que a liofilização é conhecida como o melhor método de secagem para preservar as propriedades originais das matérias-primas, sendo indicado para a conservação de substâncias sensíveis à temperatura como vitaminas e compostos bioativos (Domin *et al.*, 2020). Nessas três etapas, são contemplados estudos detalhados relativos à investigação e otimização dos parâmetros

operacionais e análises dos pós produzidos quanto às suas propriedades físico-químicas e compostos bioativos preservados após a secagem, os quais representam fatores fundamentais para a avaliação das condições de processo mais adequadas à obtenção de um produto final de qualidade.

Além dos objetivos expostos anteriormente é importante salientar que este trabalho contempla também os seguintes objetivos específicos: construir das curvas de secagem e avaliar do comportamento cinético em relação aos períodos de taxa de secagem; ajustar de modelos de secagem aos dados experimentais e obter dos parâmetros relativos à predição das taxas de secagem e difusividade efetiva; avaliação mediante métodos estatísticos dos efeitos das variáveis de operação sobre as variáveis dependentes selecionadas em cada seção deste trabalho; obtenção de modelos empíricos para predição dos dados cinéticos de secagem e avaliação da significância estatística desses modelos.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2 Revisão bibliográfica

Neste tópico é apresentada uma revisão da literatura com relação aos métodos empregados para a desidratação de frutas, dando enfoque ao método de secagem em camada de espuma que foi amplamente utilizado neste trabalho. Dentro deste tema serão abordados assuntos inerentes à transferência de calor e massa, além das características e qualidade dos pós obtidos a partir da secagem.

2.1 Aspectos gerais da ameixa

A ameixeira pertence a uma das maiores famílias de dicotiledôneas, a família das Rosáceas, subfamília das Prunoídeas, gênero *Prunus* e englobam mais de 20 espécies (Weinberger, 1975). Existem muitas variedades, no entanto as ameixas mais importantes economicamente podem ser divididas em três grupos: as europeias, as japonesas e as americanas.

Segundo Nunes (2008), dentre as espécies de ameixas europeias mais importantes estão a *Prunus insititia* e a *Prunus domestica*, sendo a última a mais significativa em nível comercial. As *P. domestica* podem apresentar características distintas em relação à cor, tamanho e forma referentes à variedade dos frutos. A diversidade desta espécie fez necessária a subdivisão em quatro grupos, tomando como referência a sua cor. Dessa forma, formaram-se os grupos das ameixas vermelhas, amarelas e verdes, originando-se também o grupo das ameixas secas, uma vez que estas são representativas comercialmente. As ameixeiras europeias apesar de pouco cultivadas no Brasil, apresentam grande importância econômica em outros países.

Já as ameixas japonesas (*Prunus salicina*) podem apresentar tamanhos e formas variados. A pele dos frutos é fina e adstringente, podendo ter cor amarela, verde ou vermelha. A polpa é caracterizada por ser firme, fibrosa e de cor amarela, vermelha ou roxa. As cultivares de ameixeira japonesa são as mais exploradas no Brasil por possuírem variedades com menor exigência em frio, as quais foram introduzidas e/ou selecionadas de acordo com as condições climáticas das regiões com potencial para sua produção (Bandeira, 2010).

Com relação às ameixas americanas, Bhutani & Joshi (1995) expuseram que a maioria delas é de variedade híbrida. Estes frutos têm a pele de cor amarela ou laranja e a polpa amarela dourada. Este grupo de ameixas tem pouca importância comercialmente. Os frutos são normalmente usados para a obtenção de compotas, sendo pouco consumidos *in natura* (Nunes, 2008).

A ameixeira é bem adaptada a climas frios, sendo cultivada em regiões de clima temperado, por requerer um período de dormência e, dependendo da variedade, uma quantidade determinada de horas de frio para adequado crescimento. O cultivo da ameixa está bem disseminado no mundo, estando presente em todos os continentes, exceto em regiões polares e regiões de clima muito quente (Figura 2.1). A grande variedade de espécies e hibridizações que garantem o desenvolvimento da cultura proporciona a sua ampla distribuição no planeta (Schneider & Azevedo Filho, 2014).

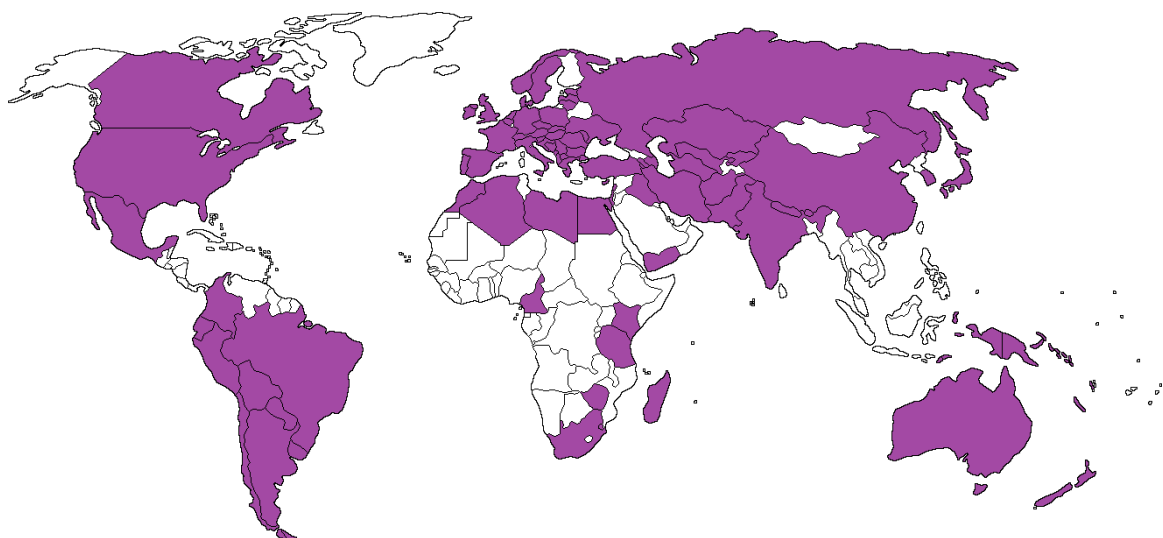


Figura 2.1 - Distribuição mundial da produção de ameixa (*Prunus*).

Fonte: Schneider & Azevedo Filho (2014).

No Brasil, a fruta é mais cultivada nas regiões sudeste e sul por apresentar clima mais favorável. Segundo Eidam *et al.* (2012), os maiores produtores são os Estados do Rio Grande do Sul, com produção anual estimada de 12.200 toneladas, Santa Catarina, com 11.000

toneladas, Paraná com 7.000 toneladas, São Paulo com 6.011 toneladas e Minas Gerais com 1.600 toneladas. Sendo necessária a importação de cerca de 10.000 toneladas para abastecer o mercado interno, já que a produção nacional de frutos não é suficiente.

2.2 Anatomia do fruto

Morfológicamente, as ameixas são drupas, ou seja, frutos carnosos com apenas uma semente protegida por um caroço ou endocarpo, o qual pode apresentar uma característica lenhosa. O caroço tem a função de conservar a semente contida em seu interior, além de armazenar energia e nutrientes suficientes para uma posterior germinação. O fruto é constituído por uma polpa volumosa e succulenta (mesocarpo) com feixes vasculares visíveis (Figura 2.2); é envolvido por uma pele muito fina (epiderme), revestida por uma camada de cutina, um polímero cuja função é reduzir a perda de água dos tecidos (Nunes, 2008).

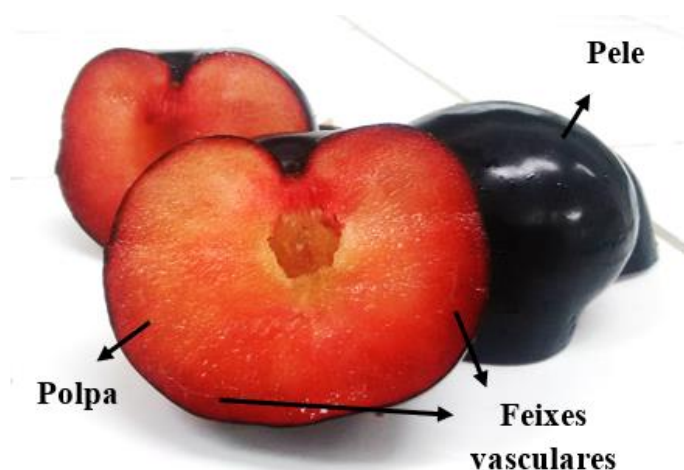


Figura 2.2 - Morfologia da ameixa.

Fonte: Arquivo pessoal.

2.3 Emulsificantes

Emulsificante ou emulsionante é toda substância capaz de formar ou manter uma mistura uniforme de duas ou mais fases imiscíveis no alimento (Anvisa, 1997). Os emulsificantes têm a função de aumentar a estabilidade das emulsões (Pavanelli, 1998) e são caracterizados por serem moléculas ambifílicas (Figura 2.3), ou seja, a mesma molécula possui uma porção polar e uma apolar; a primeira também chamada de parte hidrofílica é solúvel em água, já a segunda é insolúvel em água e é chamada de lipofílica ou hidrofóbica (Ramos, 2013).

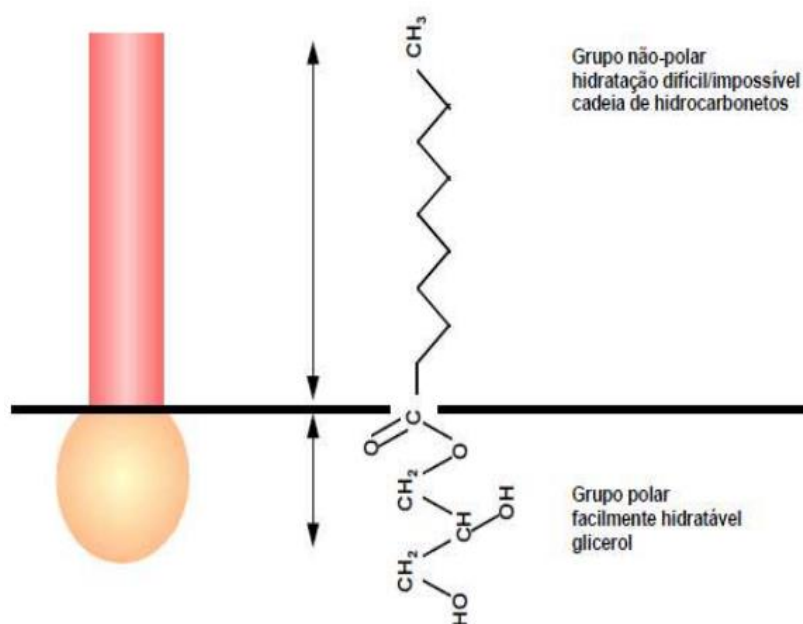


Figura 2.3 - Estrutura típica dos emulsificantes. Fonte: Ramos (2013).

A emulsificação tem um papel importante na formação da consistência e textura, bem como na dispersão de fase e na solubilização de aromas. A propriedade de formação e estabilização de emulsões é a principal característica a ser influenciada pela adição de emulsificantes em alimentos, controlando a aglomeração de glóbulos de gordura e estabilizando sistemas aerados. Os emulsificantes têm outras aplicações como: melhorar a textura e vida de prateleira de produtos contendo amido, pela formação de complexos com os componentes destes; modificar as propriedades reológicas da farinha de trigo, pela interação com o glúten; melhorar a consistência e textura de produtos à base de gorduras, pelo controle de polimorfismo e da estrutura cristalina das gorduras (Gurgel, 2014).

Os principais emulsificantes utilizados nas indústrias alimentícias são os monoglicerídeos e os ésteres de ácidos lácticos, os quais são selecionados de acordo com suas propriedades (Kamel, 1997; Gurgel, 2014). O aditivo comercial que tem apresentado resultados bastante satisfatórios é o Emustab[®], ele é de baixo custo e se mostra um bom emulsificante. Este produto é composto pelos seguintes estabilizantes: monoglicerídeos de ácidos graxos destilados (tensoativo/agentes de aeração estabilizador de cristalização), monoestearato de sorbitana (estabilizante), polioxietileno de monoestearato de sorbitana (tensoativo) e apresenta o sorbato de potássio como conservante. Na forma de pasta, apresenta facilidade de manuseio e incorporação sem formação de aglomerados verificados em emulsificantes em pó, reduzindo consideravelmente os tempos das etapas de homogeneização e aeração. A liga neutra é um produto industrial a base de sacarose e dos espessantes carboximetilcelulose (CMC) e goma guar em embalagens de 100g; é comercializada em forma de pó, enquanto o emulsificante é um gel. A sua forma de atuação como estabilizante nos alimentos consiste na absorção e fixação da água livre, retardando a viscosidade, melhorando a textura, a fim de conferir cremosidade e evitar o rápido derretimento (Gurgel, 2014).

2.3.1 Albumina de ovo

A albumina é a uma proteína de alto valor biológico contida na clara do ovo, dotada de alto valor biológico. Por conter carboidrato e fosfatos ligados ao polipeptídeo, ela é classificada como uma fosfoglicoproteína, compondo 54% das proteínas da clara e com ponto isoelétrico (PI) em torno de 4,5. Em solução, a albumina tem como característica uma relativa estabilidade ao tratamento térmico (Fennema, 2000; Stadelman & Cotterill, 1995; Sgarbieri, 1996; Almeida, 2010).

As proteínas do ovo possuem muitas propriedades tecnológicas tais como a capacidade de formação de espuma, géis e emulsões. O processo de gelificação ocorre quando as moléculas são desnaturadas em presença de calor e se agregam formando uma rede proteica orientada (Matsumura & Mori, 1996). A reação acontece pelo enfraquecimento e quebra das ligações de hidrogênio e dissulfídricas, gerando uma desestabilização da estrutura conformacional das proteínas. Após essa etapa, as moléculas de proteína se polimerizam resultando em uma estrutura tridimensional com a capacidade de imobilizar fisicamente a maior parte do solvente,

devido às interações hidrofóbicas, ligações dissulfídricas intermoleculares e interações iônicas (Mangino, 1992; Almeida, 2010).

Reconhecida pela excelente qualidade nutricional, a clara do ovo ou albúmen é amplamente utilizada em alimentos processados, devido a suas excelentes propriedades interfaciais. Estes fatores levaram à industrialização dos ovos de galinha, especialmente pelo grande consumo de alimentos processados como maioneses, produtos de panificação e confeitaria, sorvetes e massas, que usam derivados de ovos de alta qualidade na sua formulação.

2.4 Secagem

O processo de desidratação de produtos alimentícios é bastante difundido para melhorar a estabilidade dos alimentos através da redução da atividade de água do produto, com conseqüente redução da atividade microbológica e minimização de algumas alterações físicas e químicas durante o armazenamento. Além disso, a massa e volume de alimentos desidratados são menores, o que facilita e diminui os custos de transporte e armazenamento (Dantas, 2010).

A secagem é uma das técnicas mais amplamente utilizadas, dentre os métodos existentes para desidratação de alimentos (Vishwanathan *et al.*, 2010). Nesse tipo de procedimento, dois processos simultâneos podem ser observados: a transferência de calor, através da vaporização do líquido, e a transferência de massa do líquido ou vapor presente no interior do material para a atmosfera na forma de vapor (Fellows, 2006). Com isso, o processo de secagem depende de alguns fatores como: as condições internas de transferência de massa, as características do sólido e/ou as condições externas, tais como velocidade e temperatura do ar de secagem (Rahman & Perera, 2007).

Um processamento que vem sendo muito utilizado na desidratação de alimentos líquidos e pastosos é a secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) que consiste na formação de uma espuma estável no produto a ser desidratado e na sua secagem por uma corrente de ar quente.

2.4.1 Curvas de secagem e umidade de equilíbrio

As curvas de secagem de um produto são importantes porque indicam a velocidade de remoção de água em qualquer tempo medido a partir do início do processo (Meloni, 1995). Em virtude disso, o estudo da cinética de secagem é fundamental para a seleção do método, do tempo e da temperatura adequados para a secagem de produtos agrícolas, com o intuito de manter a qualidade dos produtos (Avhad & Marchetti, 2016).

O processo de secagem é geralmente dividido em dois períodos: um de taxa constante e outro de taxa decrescente. No primeiro período, as transferências de calor e massa são analisadas da superfície do material ao ar de secagem, enquanto no segundo as análises tomam como base as transferências internas que regem a secagem (Park *et al.*, 2007). Na etapa de taxa constante, a temperatura do material se iguala a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, o que promove uma taxa de secagem constante. Este período se encerra quando o material atinge o teor de umidade crítico. Já no período de taxa decrescente ocorre uma diminuição da remoção de umidade com o tempo e a taxa de secagem aproxima-se de zero, quando o material atinge a umidade de equilíbrio (Foust *et al.*, 1980).

As curvas de secagem podem ser determinadas por dois métodos: o de pesagem direta da amostra para monitoramento da perda de umidade do material ou através do acompanhamento da umidade do gás de secagem, na entrada e saída do secador, mediante utilização de instrumentos como psicômetros e higrômetros de infravermelho. Um sistema de aquisição de dados pode ser usado em ambos os métodos, através da acoplagem da balança ou do analisador de umidade relativa a um computador, por meio de sistema analógico-digital, programado para fornecer diretamente a curva de secagem em um terminal gráfico (Keey, 1992).

Na Figura 2.4, é mostrado o comportamento típico da curva de taxa de secagem de um material quando submetido à secagem em condições constantes. No início, há um curto período de pré-aquecimento do material, quando o sólido é aquecido e passa da temperatura inicial (T_0) para a temperatura de bulbo úmido (T_{bu}) até que ocorra a evaporação da água em taxa suficiente para dissipar todo o calor transferido ao sólido pela corrente de ar e manter uma temperatura constante de evaporação (área A). Depois de atingida a temperatura de equilíbrio na superfície, se estabelece o período de taxa constante (área B), no qual a quantidade de água disponível no interior do sólido é grande, fazendo com que o movimento de água em seu interior ocorra com velocidade suficiente para manter as condições de saturação na superfície, e a evaporação

continua nessa temperatura até a superfície da partícula não compensar a taxa de evaporação; o período de taxa constante termina quando a umidade crítica é atingida pelo sólido. A partir deste ponto, a temperatura é elevada e a taxa de secagem cai rapidamente (Fellows, 2000). Quando a temperatura do material começa a aumentar devido à falta de água para evaporar, é atingido o período de taxa de secagem decrescente que inicia no ponto C e pode ser dividido em duas zonas: trecho C, zona de secagem da superfície insaturada e trecho D, zona na qual o movimento interno do líquido controla a secagem. Neste último trecho, acontece a evaporação do líquido existente no interior do material e a secagem termina quando é atingida a umidade de equilíbrio (U_{eq}), ou seja, ponto em que a pressão de vapor do líquido presente no sólido é igual à pressão parcial de vapor da água contida no gás secante.

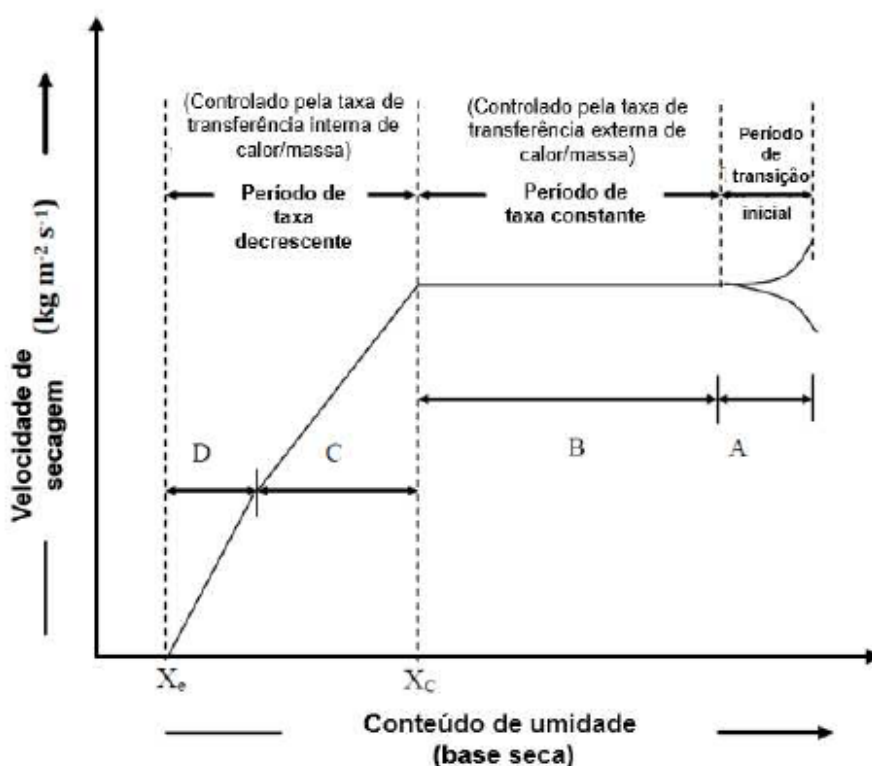


Figura 2.4 - Curva típica de taxa de secagem sob condições constantes. Fonte: Adaptado de Jangam *et al.* (2010).

Ao atingir a umidade de equilíbrio o sólido não sofrerá mais variações de umidade e esta independará do tempo de secagem desde que sejam mantidas as condições do sistema. (Keey, 1992). Observa-se o comportamento da curva de umidade de equilíbrio através da Figura 2.5. A umidade de equilíbrio é o mínimo conteúdo de umidade que um material pode teoricamente ser seco para a condição de processo dado. É atingida quando o alimento é deixado

por tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve (Celestino, 1998).

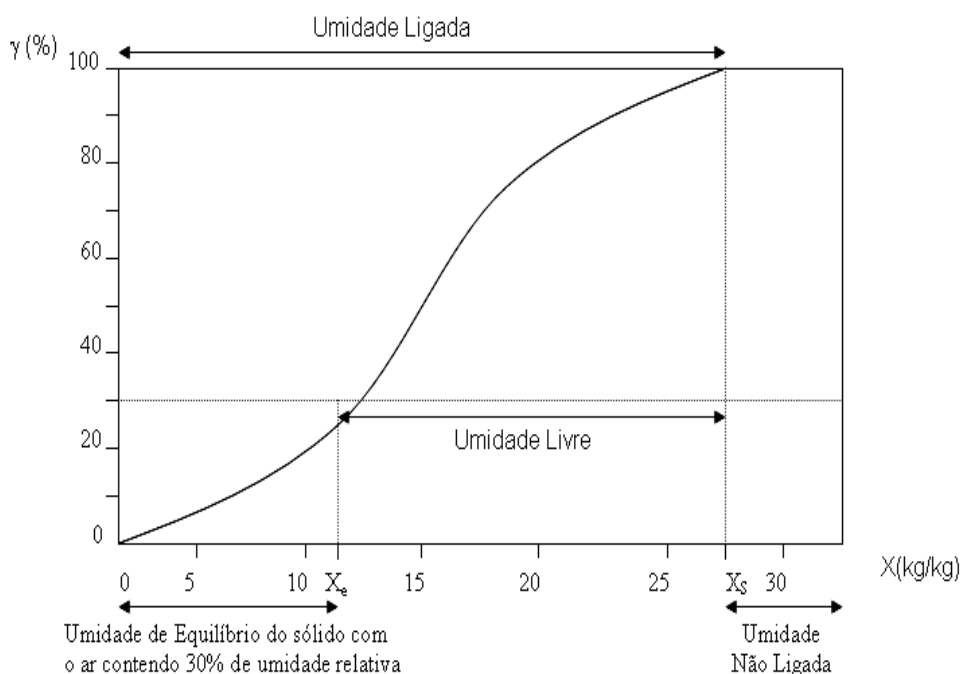


Figura 2.5 - Gráfico de Umidade de Equilíbrio. Fonte: Keey (1992).

2.4.2 Secagem em camada de espuma - *foam-mat drying*

O método de secagem em camada de espuma (*foam-mat drying*) foi desenvolvido na década de 1950 por Morgan e sua equipe na Califórnia, EUA, e patenteada em 1961 (Marques, 2009). É uma técnica que promove rápida secagem de alimentos líquidos, tais como sucos de frutas, e vem sendo muito utilizada também para alimentos pastosos como purê ou polpas de frutas (Franco *et al.* 2015).

O método consiste na transformação do produto úmido em uma espuma estável, com o auxílio de agentes espumantes e, algumas vezes, de estabilizantes. Nesta técnica, uma característica marcante é a alta taxa de secagem que resulta em um menor tempo de exposição do material ao calor, em virtude do aumento da área de contato do produto com o ar de secagem. Isso faz com que a degradação de compostos termolábeis seja minimizada, uma vez que o

produto fica exposto a alta temperatura por menor tempo (Karim & Wai, 1999; Kadam & Balasubramanian, 2011; Araújo *et al.*, 2017; Vimercati *et al.*, 2019).

Muitos alimentos naturalmente contêm proteínas solúveis e monoglicerídeos capazes de produzir espumas quando agitados, no entanto, as espumas produzidas podem ser insatisfatórias para a desidratação, sendo necessário também adicionar agentes espumantes para induzir a formação de espuma (Sankat & Castaigne, 2004). Com isso, a adição de um agente espumante, como a proteína de soja, albumina, ésteres de ácidos graxos e monoestearatos de glicerol, e a incorporação de ar ou outros gases como o nitrogênio (por ser inerte) por injeção direta ou agitação são fatores primordiais para a transformação do líquido em espuma. Algumas vezes, apenas a adição de agentes espumantes não é suficiente para produzir uma espuma estável e, devido a isso, aplica-se produtos estabilizantes para ajudar a aumentar a estabilidade da espuma durante a secagem. A medida em que a concentração do agente espumante é aumentada, a densidade da espuma diminui, uma vez que uma maior quantidade de ar é incorporada durante a mistura (Falade *et al.* 2003). A espuma é distribuída em bandejas com baixa espessura, as quais são posteriormente levadas ao secador (Brennan, 2006) e submetidas a temperaturas que geralmente não ultrapassam 90°C. O produto desidratado é moído e convertido em pó.

Entre as vantagens do processo *foam-mat*, destacam-se: baixa temperatura de operação, tempo de secagem mais curto devido à maior área de superfície exposta ao ar e maior velocidade de secagem. Estes fatores superam o fato da transferência interna de calor ser comprometida pelo grande volume de gás presente na massa de espuma. O processo além de permitir uma rápida remoção de água, promove a obtenção de um produto poroso e de fácil reidratação, sendo aplicada em muitos alimentos sensíveis ao calor, como os sucos de frutas (Sankat & Castaigne, 2004; Bastos *et al.*, 2005). A escolha do tempo e da temperatura de desidratação depende do produto a ser desidratado.

Essa técnica apresenta como principal desvantagem, em relação a outros meios de secagem de líquidos, a necessidade de grande área de superfície de secagem para que consiga atender elevadas taxas de produção, o que eleva o custo de investimento (Francis, 2000). Além dessa, outra desvantagem é que os aditivos podem modificar as características de sabor, aroma e cor do alimento. Outra dificuldade relatada por Karim & Wai (1999) é a falta de estabilidade da espuma durante o aquecimento na secagem. Algumas variáveis como a natureza química das matérias-primas, sólidos solúveis, tipo e concentração de agente espumante influenciam na estabilidade das espumas (Hart *et al.*, 1963).

Por ser um processo simples e barato que garante a obtenção de produtos em pó com características preservadas, a secagem em camada de espuma oferece grandes possibilidades comerciais, principalmente para alimentos sensíveis ao calor. Este método já foi aplicado em diversos produtos como: polpa de acerola (Soares *et al*, 2001), manga (Bastos *et al*, 2005), tamarindo (Gurjão, 2006), caldo de cana (Marques, 2009), manga e abacaxi (Dantas, 2010), banana (Falade *et al*, 2010; Thuwapanichayanan *et al*, 2012), goiaba (Cruz, 2013), suco misto de açaí, morango e acerola (Rocha, 2013), graviola (Gurgel, 2014) e cenoura, tomate, beterraba e morango (Roncheti, 2014). Esses diversos estudos, assim como outros, foram conduzidos com o objetivo de caracterizar os produtos obtidos após a secagem e determinar as melhores condições operacionais como: temperatura de secagem, espessura da camada, tipo e concentração de aditivos.

Falade *et al*. (2003) estudaram a secagem em camada de espuma de feijão cowpea (*Vigna unguiculata*), usando como agentes espumantes monoesterato de glicerol e albumina de ovo. Observaram que a densidade da espuma decresceu com o aumento da concentração dos agentes espumantes e que os sólidos totais decresceram. A análise sensorial mostrou diferenças no sabor, em função da concentração dos aditivos.

Gurjão (2006) produziu extrato em pó de tamarindo pelo processo de secagem em camada de espuma utilizando albumina como aditivo, nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80°C e observou que as melhores temperaturas para a secagem da polpa de tamarindo foram 60 e 70°C. O extrato obtido foi avaliado em relação à cor, sólidos solúveis totais, acidez total titulável, vitamina C e pH.

Dantas (2010) estudou a desidratação da polpa de manga e de abacaxi em camada de espuma, utilizando como agentes espumantes (1% p/p Emustab® e 1% p/p liga neutra). Concluíram que as melhores condições de taxas de secagem foi a 70°C e a espessura de 4 mm para ambas as frutas, e que nessa temperatura os pós de manga e de abacaxi apresentaram pH ácidos, sólidos solúveis elevados e baixa atividade de água. Apresentaram também elevada solubilidade e rápida reconstituição em água.

Thuwapanichayanan *et al*. (2012) investigaram as influências da densidade da espuma e os tipos de agentes espumantes na difusividade da umidade, bem como a qualidade em termos de microestrutura, textura e perdas voláteis de espumas de banana. Neste estudo, foram utilizados três agentes de formação de espuma, isto é, albumina de ovo, isolado de proteína de

soja e concentrado de proteína de soro de leite. Os resultados experimentais mostraram que a espuma de banana com proteína do soro do leite poderia reter uma estrutura mais aberta durante a secagem. Essa morfologia proporcionou menos retração e levou a valores mais altos da difusividade efetiva em comparação com a das espumas de banana com isolado de proteína e albumina de ovo. Com relação à textura, as espumas de banana com proteína do soro do leite e albumina eram esponjosas e menos nítidas que a espuma de banana com proteína de soja. Amostras com densidades mais baixas de espuma exibiram maiores valores de difusividade efetiva, menor dureza e menor nitidez do que aquelas com maiores densidades de espuma. As perdas de substâncias voláteis foram substanciais durante todas as etapas do processamento, mas as principais perdas ocorreram durante a etapa de formação de espuma.

Gurgel (2014) estudou a desidratação da polpa de graviola em camada de espuma, avaliando o desempenho do processo e as características do produto obtido. Os experimentos foram realizados conforme planejamento experimental 2³, com 3 repetições no ponto central. Foram investigados os efeitos da temperatura 50°C, 60°C e 70°C, espessura da camada (0,30 cm, 0,45 cm e 0,60 cm e concentração de leite 0%, 20% e 40% na cinética de secagem, avaliando o comportamento das curvas e as características físico-químicas do produto em pó. Os resultados mostraram o importante efeito da temperatura no sentido de aumentar as taxas de secagem e que espumas mais espessas apresentaram menores taxas de secagem. Com relação aos resultados das análises físico-químicas, a graviola em pó apresentou características adequadas para conservação.

Roncheti (2014) utilizou a tecnologia de secagem em camada de espuma aplicada a cenoura, beterraba, tomate e morango. Neste trabalho, os quatro produtos foram submetidos à secagem a temperaturas controladas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. A descrição da cinética de secagem foi realizada pelo ajuste de modelos matemáticos para cada temperatura do ar de secagem. Foi proposto um modelo matemático generalizado ajustado por regressão não linear. O modelo de Page obteve o melhor ajuste sobre os dados de secagem em todos os produtos testados, com um coeficiente de determinação (R²) superior a 98% em todas as temperaturas avaliadas. Além disso, foi possível modelar a influência da temperatura do ar sobre o parâmetro k do modelo de Page através da utilização de um modelo exponencial. O coeficiente de difusão efetiva aumentou com a elevação da temperatura, apresentando valores entre 10⁻⁸ e 10⁻⁷ m².s⁻¹ para as temperaturas de processo. A relação entre o coeficiente de difusão efetiva e a temperatura de secagem pôde ser descrita pela equação de Arrhenius.

Shaari *et al.* (2018) estudaram o efeito da concentração do agente espumante e do tempo de batimento nas propriedades do pó de abacaxi. O suco de abacaxi foi espumado com albumina de ovo em diferentes concentrações (5, 10 e 20%, p/p) e tempo de batimento (10, 20 e 30 min). Neste estudo, foram avaliadas as propriedades físico-químicas como índice de absorção de água, índice de solubilidade em água, conteúdo fenólico total, sólido solúvel total, pH, cor, atividade da água, teor de umidade, densidade aparente, higroscopicidade e taxa de reidratação. Evidenciaram que à medida que a concentração do agente espumante aumenta a um tempo de batimento constante, a densidade da espuma diminui e a expansão da espuma aumenta. Os resultados indicaram que as propriedades de formação de espuma e as propriedades físico-químicas do pó foram significativamente afetadas pelo tempo de batimento ($p \leq 0,05$) e pela concentração de albumina de ovo ($p \leq 05$).

Dehghannya *et al.* (2019) estudaram os efeitos de interação de múltiplas variáveis, incluindo concentração de albumina de ovo, espessura da espuma e temperatura do ar, para analisar suas interações simultâneas sobre características de qualidade durante a secagem do suco de limão. O processo também foi modelado para estudar o efeito da concentração de albumina de ovo, espessura da espuma e temperatura do ar nas distribuições de umidade e temperatura. Os pesquisadores evidenciaram que um aumento na concentração de albumina de ovo reduziu a densidade da espuma enquanto aumentava sua expansão, porosidade e estabilidade. Maior temperatura do ar, concentração de albumina e espessura da espuma reduziram o índice de solubilidade em água e aumentaram o índice de absorção de água. O aumento da temperatura de 50 para 70 ° C intensificou a taxa de secagem em 25,58%. Além disso, o índice de cor, ângulo de matiz e índice de escurecimento diminuíram com o aumento da temperatura. O desempenho do modelo foi avaliado através da comparação de dados experimentais e do modelo ($R^2 = 0,911$). Em resumo, os pós de suco de limão produzidos neste estudo pelo processo de secagem em camada de espuma produziram resultados promissores em termos de cor do produto, absorção de água, porosidade e fluidez, entre outras características de qualidade.

2.4.3 Liofilização

A liofilização é um método de secagem no qual a umidade contida no material é retirada através do congelamento da água e posterior sublimação do gelo. Esse processo por ocorrer a

baixas temperaturas e, geralmente a vácuo, é recomendado para materiais que contenham compostos sensíveis termicamente em sua composição como, por exemplo, materiais biológicos, produtos farmacêuticos e alimentos. Dentre as vantagens deste método pode-se destacar: a interrupção da maioria das reações oxidativas e microbiológicas devido à ausência de água líquida e às baixas temperaturas necessárias para o processo, o que resulta em um produto final de excelente qualidade e a conservação da estrutura primária e compostos termossensíveis em virtude da proteção oferecida pelo estado sólido da água durante a secagem. Apesar de muitas vantagens, a liofilização sempre foi reconhecida como o processo mais oneroso para a fabricação de produtos desidratados (Ratti, 2001).

O processo de liofilização compreende três estágios: o primeiro é o congelamento, fase determinante para que a liofilização seja eficiente, uma vez que é durante esta etapa que são definidos a forma, o tamanho, a distribuição e a conectividade dos poros na camada seca, formada durante a sublimação. Desse modo, o congelamento eficiente é de fundamental importância, pois afeta os parâmetros que caracterizam a transferência de massa e de calor no produto seco durante a secagem primária e secundária. Rápidas taxas de congelamento permitem uma melhor preservação das ultraestruturas celulares, como consequência da formação de pequenos cristais de gelo e da nucleação intracelular; a sublimação ou secagem primária, é o segundo estágio da liofilização, que consiste na remoção do solvente congelado em baixas pressões, inferiores ou próximas daquelas inerentes a pressão de vapor de equilíbrio deste solvente; a última etapa do processo é a dessorção que pode ser descrita como sendo um processo de retirada da água associada à estrutura do material. Por restar ainda uma pequena quantidade de umidade, essa fase ocorre em velocidade mais lenta que a sublimação, restando ao seu final, uma fração de umidade residual concernente àquela necessária para manter o produto em condições de armazenamento por longos períodos (Marques, 2008).

2.5 Modelagem do processo e ajustes de modelos matemáticos

A utilização de modelos matemáticos é de fundamental importância para predição do desempenho dos processos, considerando-se que uma análise por simulações é menos dispendiosa que um estudo prático-experimental. Além de serem usados no projeto básico de equipamentos, os modelos matemáticos são importantes também para auxiliar na elaboração de estratégias de controle automático, bem como podem ser aplicados em técnicas de otimização

visando maximizar ou minimizar propósitos técnico-econômicos, de planejamento de produção, de integração energética e de condições operacionais, entre outros.

Em particular no processo de secagem, a modelagem matemática é capaz de descrever os fenômenos e obter informações essenciais, principalmente sobre as variáveis temperatura e umidade (Özdemir & Devres, 1999; Franco, 2015). Diversos modelos matemáticos são utilizados para descrever os processos de secagem e, em geral, no caso particular dos secadores de bandejas, tais modelos estão baseados nas hipóteses de camada fina ou camada espessa, sendo a primeira caracterizada pela homogeneidade no domínio espacial e dependência apenas do tempo, enquanto a segunda hipótese assume dependência das variáveis tanto no espaço quanto no tempo.

Os modelos matemáticos para os secadores de bandeja geralmente são desenvolvidos conforme uma das seguintes abordagens: teóricos, semiempíricos e empíricos. Os modelos teóricos baseiam-se fundamentalmente nas leis de conservação aplicadas para o gás de secagem e para o material, segundo as equações de transferência de massa e calor. Por terem uma base fenomenológica, são capazes de avaliar de forma adequada variáveis de resposta do processo, tais como: umidade e temperatura. Os modelos semiempíricos admitem que o processo ocorre isotermicamente, levando em conta apenas os fenômenos de transferência de massa (Zanoelo *et al.*, 2007). Já os modelos empíricos são bastante usados para correlacionar dados experimentais e ajustar equações para a cinética de secagem., porém omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não apresentam significado físico. Com isso, não fornecem uma visão clara dos processos essenciais que ocorrem durante o fenômeno, mesmo que descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais (Madamba, 2003; Mcminn, 2006; Doymaz, 2007).

No que diz respeito à secagem de materiais sólidos, existem muitos trabalhos publicados com a abordagem de modelos teóricos, das quais é possível citar: Luikov (1975), que desenvolveu um modelo completo admitindo transferência de massa e calor em meios capilares porosos não saturados, levando em conta o efeito de gradientes. Outra abordagem teórica tem sido bastante utilizada pelos pesquisadores, que consiste no desenvolvimento de modelos a duas fases, onde os balanços de massa e energia são escritos para a fase sólida (material que se deseja secar) e para a fase gás (o ar geralmente utilizado como gás de secagem). Calçada (1994) utilizou desta abordagem para descrever a secagem de milho em um secador de leito fixo e Mayta (1994) avaliou a influência das variáveis operacionais na secagem de milho e validou

um modelo a duas fases para um secador em leito deslizante e fluxos cruzados; Mancini (1996), num secador de camada delgada, validou um modelo a duas fases para a secagem de milho, soja e feijão; Corazza *et al.* (2003) propuseram um modelo transiente para um secador de esteira usado na secagem de gelatina, baseando-se também na abordagem a duas fases; Lima (2004) propôs uma simplificação do modelo a duas fases proposto por Massarani & Silva Teles (1992); Iguz *et al.* (2003) propuseram um modelo a duas fases para um processo de secagem de vegetais; Vieira (2014) implementou um modelo a duas fases para descrever a secagem de resíduos de goiaba num secador com múltiplas bandejas.

A maior parte dos modelos aplicados para secagem em camada de espuma está baseada na teoria difusional da Lei de Fick (Eq. 2.1), considerando-se: distribuição inicial de umidade uniforme, difusividade de umidade constante e uma geometria em forma de placa plana infinita (Crank, 1975; Franco, 2015).

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n - 1)^2} \cdot \exp\left(\frac{(2 \cdot n - 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2}\right) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Na Eq. 2.1, RU é a razão de umidade adimensional, D_{eff} é a difusividade efetiva ($m^2 \cdot s^{-1}$), e L é a espessura da placa plana (m), n é o número de termos a ser considerado no somatório da solução e t é a variável tempo (s).

Conforme exposto por Franco *et al.* (2015), apesar da grande variedade de modelos matemáticos propostos para a descrição do processo de secagem de alimentos, os mais utilizados são os modelos de secagem em camada delgada, que têm a capacidade de descrever o fenômeno de uma maneira unificada, independentemente dos mecanismos de controle. Tais autores desenvolveram um modelo matemático teórico com base nos balanços de massa e energia para um secador de bandeja empregado na secagem em camada de espuma de batata *yacon*. O modelo considerou as propriedades termofísicas homogêneas ao longo da camada da espuma, mas variando ao longo do tempo como uma função da umidade do material.

2.6 Transferência de calor e massa

A transferência de calor e massa em frutas e vegetais durante a secagem por convecção representa um fenômeno complexo e um dos motivos para isso é a interligação entre esses processos, que resulta do fato de que não apenas o gradiente de umidade, mas também o

gradiente de temperatura do material são as forças motrizes para a transferência de massa (Mukherjee *et al.*, 1997). Por outro lado, a transferência de calor é fortemente influenciada pelo fato de que, na secagem por convecção, a água sai do corpo quase exclusivamente na forma de vapor d'água. Materiais como frutas e vegetais são caracterizados pela estrutura coloidal-capilar e pelo alto teor de umidade inicial (Białobrzewski, 2006). Quase sempre na secagem convectiva de tais materiais, observa-se uma contração significativa (Islam & Mujumdar, 2003; Mihoubi *et al.*, 2004). O aparecimento de encolhimento por secagem está relacionado, mais frequentemente, a uma perda significativa de água do material.

Uma forma de analisar como esses fenômenos se relacionam é através do estudo dos números adimensionais para transferência de calor e massa. Aplica-se o método de análise dimensional porque reduz o número de variáveis de um problema a um conjunto menor e sem dimensão física. Os parâmetros adimensionais possuem interpretações físicas que estão relacionadas às condições no interior das camadas limite. Dentre os diversos números adimensionais estabelecidos para os processos de transferência de calor e massa, foram aplicados, neste estudo, os seguintes: Prandtl, Reynolds, Schmidt, Nusselt, Sherwood e Biot.

A interpretação física do número de Prandtl (Pr) se origina na sua definição como a razão entre a difusividade de momento e a difusividade térmica. O Pr fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas limite fluidodinâmica e térmica, respectivamente (Incropera & Dewitt, 1990).

As camadas limite fluidodinâmica e térmica se desenvolvem simultaneamente em fenômenos de transferência de calor por convecção quando existe movimento do fluido e a espessura relativa destas duas camadas é melhor descrita através do número de Prandtl, visto que ele representa a relação entre a dissipação de quantidade de movimento e de calor através do fluido (Kreith & Bohn, 2001).

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} = \frac{\text{difusividade molecular de quantidade de movimento}}{\text{difusividade molecular térmica}} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Onde c_p é o calor específico do fluido (J/K/kg), μ é a viscosidade dinâmica (Pa.s) e k é a condutividade térmica (W/m.K).

O calor se difunde muito rapidamente para $Pr \ll 1$ e muito lentamente para $Pr \gg 1$, em relação à quantidade de movimento. Como consequência números de Prandtl inferiores a 1 apresentam uma camada limite térmica mais espessa que a fluidodinâmica, e para valores superiores a 1 acontece o inverso (Incropera & Dewitt, 1990).

O número de Nusselt (Nu) corresponde ao gradiente de temperatura adimensional na superfície e fornece uma medida da transferência de calor por convecção que ocorre nessa superfície. Esse parâmetro é função do Reynolds e Prandtl ($Nu = f(Re, Pr)$).

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k_f} = \frac{\text{transferência de calor por convecção}}{\text{transferência de calor por condução}} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde h é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), d é o comprimento característico (m) e k_f é a condutividade térmica do fluido ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

O número de Nusselt relaciona a transferência de calor por convecção e por condução para um mesmo fluido em toda a camada (Figura 2.6). Quanto maior for o número de Nusselt, mais eficiente será a troca de calor por convecção. O Nu , de uma forma geral, pode ser expresso como sendo dependente da geometria, da condutividade térmica, do tipo de escoamento (uma vez que é função do número de Reynolds), dentre outras variáveis (Kreith & Bohn, 2001).

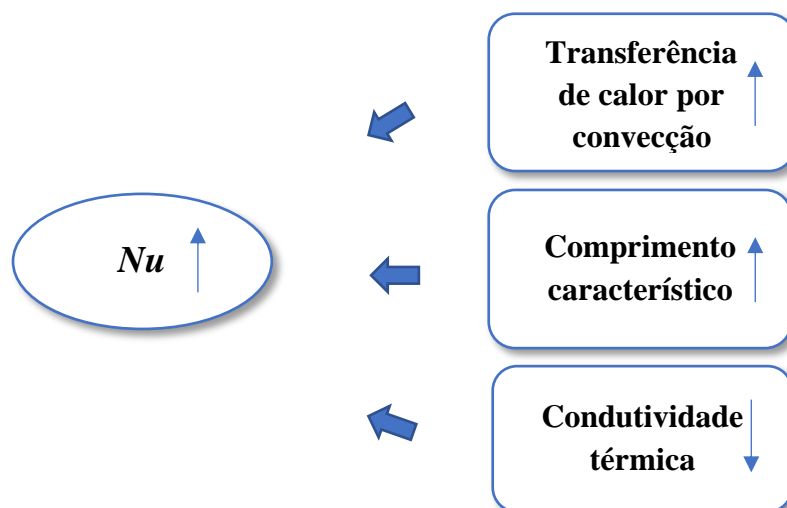


Figura 2.6 - Fatores que influenciam o número de Nusselt. Fonte: autora.

Em estudos de convecção forçada, o número de Sherwood (Sh) é função dos números de Reynolds e Schmidt, $Sh = f(Re, Sc)$. O Sh corresponde ao gradiente de concentração adimensional na superfície e fornece uma medida da transferência de massa por convecção que ocorre nessa superfície (Figura 2.7) (Incropera & Dewitt, 1990). É um número adimensional utilizado em operações de transferência de massa e representa a razão de transferência de massa convectiva e difusiva.

$$Sh = \frac{h_m \cdot d}{D_{AB}} = \frac{\text{transferência de massa convectiva}}{\text{transferência de massa difusiva}} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Onde h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s), d é o comprimento característico (m) e D_{AB} é o coeficiente de difusividade de massa (m²/s).

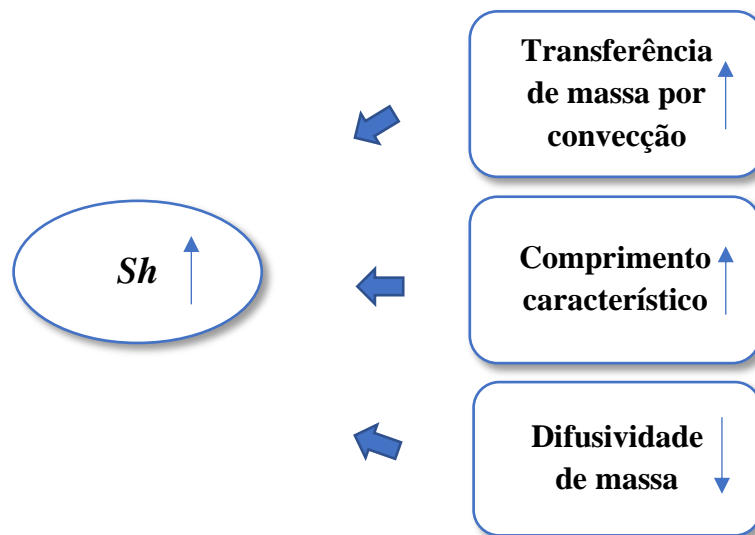


Figura 2.7 - Fatores que influenciam o número de Sherwood. Fonte: autora.

O número de Reynolds pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas na camada limite fluidodinâmica. O número de Reynolds quantifica a relação

entre as forças de inércia e viscosa e suas influências no movimento da mistura (Welty *et al.*, 1998; Cremasco, 2008).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças viscosas}} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde ρ é a densidade (kg/m^3), v é a velocidade (m/s), D é a dimensão característica do fluxo (m) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

O número de Schmidt (Sc) é igual a razão entre as difusividades de momento e mássica (Figura 2.8). O Sc representa a simultaneidade entre os fenômenos de transferência de quantidade de movimento e transferência de massa em nível molecular, indicando a relação entre as forças viscosas e o fenômeno de difusão (Incropera & Dewitt, 1990).

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} = \frac{\text{Difusividade de momento}}{\text{Difusividade de massa}} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

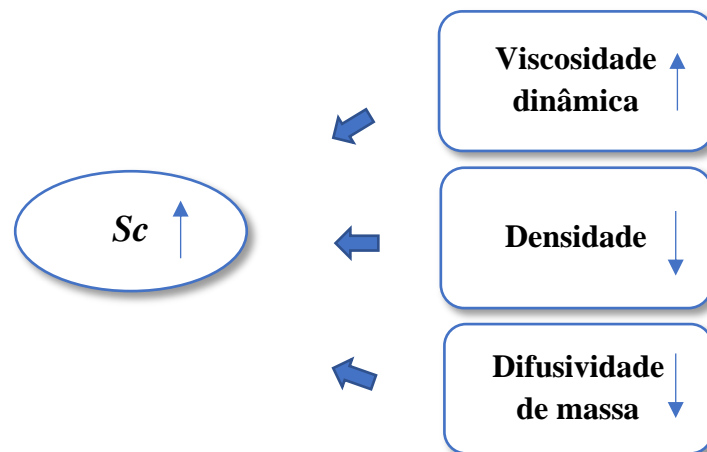


Figura 2.8 - Fatores de influenciam o número de Schmidt. Fonte: autora.

O número de Biot para transferência de calor, Bi , desempenha um papel fundamental nos problemas de condução térmica que envolvem efeitos convectivos nas fronteiras. Este número

adimensional fornece uma medida da relação entre a queda de temperatura ao longo do sólido e a diferença de temperatura da superfície e do fluido. Se $Bi \ll 1$, a resistência térmica condutiva no interior do sólido é muito menor do que a resistência térmica convectiva através da camada limite no fluido (Incropera & Dewitt, 1990).

$$Bi = \frac{h \cdot d}{k} = \frac{\text{Resistência térmica interna em um sólido}}{\text{Resistência térmica na camada limite}} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde h é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), d é o comprimento característico (m) geralmente definido pela razão entre o volume do sólido e a sua área superficial e k é a condutividade térmica do sólido ($\text{W/m}\cdot\text{K}$).

Convém salientar que apesar da semelhança entre o número de Biot e o número de Nusselt, eles representam correlações diferentes, visto que o número Biot fornece a relação entre a transferência de calor por convecção e a transferência de calor por condução na qual a condução está ocorrendo no corpo e a convecção no fluido ao redor do corpo. O número de Nusselt também fornece a mesma relação, entretanto a condução e a convecção estão ocorrendo apenas no fluido. O número Nu fornece o aprimoramento da transferência de calor como resultado da convecção relativa à condução. Não havendo o aprimoramento da transferência de calor pela convecção, é possível dizer que todo o calor está sendo transferido apenas por condução, isso corresponde ao caso de $Nu = 1$.

O número de Biot para transferência de massa, Bi_m , fornece a razão entre a resistência interna à transferência de massa de uma espécie e a resistência à transferência de massa da espécie na camada limite (Incropera & Dewitt, 1990).

$$Bi_m = \frac{h_m \cdot d}{D_{AB}} = \frac{\text{Resistência interna à transferência de massa}}{\text{Resistência à transferência de massa na camada limite}} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa (m/s), d é o comprimento característico (m) geralmente definido pela razão entre o volume do sólido e a sua área superficial e D_{AB} é o coeficiente de difusividade de massa (m²/s).

Assim como existe uma semelhança entre o número de Biot e o de Nusselt, também é possível observar relações análogas para o número de Biot para transferência de massa (Bi_m) e o número de Sherwood (Sh), a diferença consiste no meio ao qual os dois números são aplicados. O Bi_m relaciona as resistências que ocorrem no sólido e no fluido, enquanto o Sherwood refere-se apenas às resistências ao transporte no fluido.

2.7 Produtos desidratados em pó

O processo de desidratação dos alimentos reduz a atividade de água e proporciona o prolongamento da vida útil do produto, além de facilitar o armazenamento e transporte, em virtude da diminuição da massa total (Raupp *et al.*, 2009). A quantidade de água disponível é a principal causa para a alta perecibilidade dos alimentos e, devido a isso, a operação de secagem aplicada as mais diversas frutas e vegetais constitui uma alternativa para diversificar mercados, reduzir perdas pós-colheita e obter produtos com maior vida de prateleira, devido à alta estabilidade microbiológica do produto em pó.

As polpas e os sucos de frutas podem ser armazenados por períodos que variam de semanas a meses enquanto os produtos em pó produzidos a partir desses alimentos podem ser conservados por meses e anos dependendo da embalagem (Shishir *et al.*, 2018). Com isso, tem sido desenvolvida uma grande quantidade de alimentos em forma de pó, sendo possível encontrar os mais diferentes produtos no mercado. Além dos já comercializados como, por exemplo, café, leite, achocolatados, temperos, entre outros, muitas frutas e vegetais também estão sendo fabricados e fornecidos com o objetivo de aumentar a disponibilidade do alimento e oferecer uma forma de suplementação da alimentação quanto aos nutrientes presentes em cada um deles.

Dentre as aplicações dos alimentos em pó, destacam-se as seguintes: a diluição em um líquido para ser consumido como bebida, a adição em misturas alimentícias e consumo para suplementação da dieta. Em virtude disso, as análises para a caracterização do pó quanto as suas propriedades físico-químicas e bioativas são essenciais, tanto para avaliar o impacto da

secagem sobre o produto quanto para verificar a qualidade desse alimento. Algumas das análises que normalmente realizam-se são: densidade para avaliar o grau de empacotamento das partículas; solubilidade para verificar se o pó é solúvel em água; higroscopicidade para investigar a capacidade de adsorção do pó; atividade de água e umidade para analisar a disponibilidade de água para as reações químicas e microbiológicas; acidez total titulável que mede a acidez do produto com base no ácido orgânico predominante; compostos bioativos que identificam e fornecem dados importantes sobre compostos fenólicos, capacidade antioxidante, dentre outros.

Com isso, a caracterização do pó mostra-se essencial, uma vez que além de haver o impacto da secagem, a estabilidade do produto final ainda é muito susceptível às variações ambientais, podendo ocorrer fenômenos indesejáveis, como colapso, *stickiness* (pegajosidade) e/ou *caking* (empedramento), durante a produção e armazenamento, por isso conhecer as características inerentes a cada material proporciona a melhoria do processo e consequentemente a obtenção de um produto com qualidade superior (Gurgel, 2020).

2.8 Estresse oxidativo e potencial antioxidante

No organismo, a geração das espécies reativas de oxigênio (ERO) constitui um processo contínuo e fisiológico, cumprindo funções biológicas relevantes. Durante os processos metabólicos, essas espécies possuem uma função importante porque atuam como mediadores para a transferência de elétrons nas várias reações bioquímicas. A produção, em proporções adequadas, proporciona algumas vantagens como: a geração de ATP (energia), por meio da cadeia transportadora de elétrons; ativação de genes; e participação de mecanismos de defesa durante o processo de infecção. Entretanto, um desequilíbrio nesse processo que ocasione a produção excessiva pode conduzir a danos oxidativos (Ferreira & Matsubara, 1997; Shami & Moreira, 2004).

Substâncias antioxidantes são aquelas que, em baixas concentrações, previnem ou retardam o processo oxidativo, ou seja, a deterioração pela ação do oxigênio; podendo ser de origem sintética ou natural (Moura, 2011). Podem interferir em diversos estágios do processo de oxidação envolvendo moléculas de lipídeos. Atuando no decréscimo da concentração de

oxigênio, interceptando o oxigênio singlete (poderoso oxidante de biomoléculas); bloqueando a fase inicial da oxidação pela captura dos radicais hidroxil; agindo na quebra de produtos primários em outros componentes que não são radicais (Prado, 2009).

Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm mostrado o potencial benéfico das substâncias antioxidantes para o organismo humano. As frutas, principalmente as cítricas, se destacam neste contexto por apresentarem em sua composição carotenoides, flavonoides, ácido ascórbico (vitamina C), ácidos fenólicos, dentre outras substâncias antioxidantes capazes de prevenirem o ser humano contra várias doenças crônicas vasculares, neurológicas e até determinados tipos de cânceres (Gardner *et al.*, 2000; Johnston & Bowling, 2002; Sánchez-Moreno *et al.*, 2003; Gama & Sylos, 2007; Pernice *et al.*, 2009; Moura, 2011).

Nas últimas décadas, inúmeras pesquisas foram feitas com o intuito de esclarecer a atuação dos radicais livres em processos como envelhecimento e doenças degenerativas associadas ao envelhecimento, câncer, aterosclerose, inflamação, doenças cardiovasculares, catarata, declínio do sistema imune e disfunções cerebrais (Valko *et al.*, 2007; Winterbourn, 2008; Misra *et al.*, 2009; Dias *et al.*, 2010; Ferreira *et al.*, 2010; Liochev, 2013; Michalska *et al.*, 2019). Os radicais livres são átomos ou grupos de átomos que possuem um elétron desemparelhado (R^{\bullet}), com isso são altamente reativos e suas reações geram outros radicais livres (reação em cadeia) (Atoui *et al.*, 2005). Como exemplos de radicais livres pode-se citar: o oxigênio singlete e as espécies reativas do oxigênio, radical hidroxil (OH^{\bullet}), ânion superóxido (O_2^-), radical peroxil (ROO^{\bullet}), radical alcoxil (RO^{\bullet}) e óxido nítrico (NO^{\bullet}) (Sjodin *et al.*, 1990; Pereira, 1994; Aruoma, 1994; Yu, 1994). De acordo com Moura (2011), o OH^{\bullet} e o O_2^- são os radicais livres que têm maior importância biológica, já que são formados dentro das mitocôndrias durante o processo normal ou exacerbado de redução do O_2 . O estresse oxidativo é o resultado do desequilíbrio entre a peroxidação e a antioxição, com maior produção de espécies reativas de oxigênio e menor produção de antioxidantes, caracterizando-se, principalmente, pela peroxidação da membrana lipídica celular (Aw *et al.*, 1991; Evelo *et al.*, 1992).

Nesse contexto, alimentos com alto teor de componentes antioxidantes são bastante necessários na dieta. A ameixa é rica em muitos minerais e vitaminas (C, A, B1, B2), essenciais para o funcionamento adequado do organismo humano. São frutos que possuem compostos bioativos ou fitoquímicos, antocianinas e outros compostos fenólicos, caracterizados pela significativa capacidade antioxidante, capaz de restringir a propagação das reações em cadeia e

as lesões induzidas pelos radicais livres (Arion *et al.*, 2014). A forte atividade antirradicais livres da ameixa é essencialmente atribuída aos seus compostos polifenólicos (Rupasinghe *et al.*, 2006).

2.8.1 Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos ou polifenóis são compostos biologicamente ativos, originados a partir do metabolismo secundário das plantas (Martins *et al.*, 2016). Possuem como modelo estrutural básico um grupo fenol, constituído por um anel aromático com um ou mais substituintes hidroxílicos. Dentre os metabólitos secundários são o maior grupo com mais de 8.000 estruturas identificadas. Os polifenóis podem ser agrupados em diferentes classes devido a sua ampla diversidade estrutural, a qual se deve a quantidade de combinações que ocorrem na natureza, sendo divididos em diversas classes com base no tipo de estrutura principal que constitui o anel benzênico e na cadeia substituinte (Liu, *et al.*, 2015). Os compostos fenólicos mais comuns são: ácidos fenólicos e flavonoides. Normalmente, apresentam-se como conjugados solúveis em água (glicosídeos) e formas insolúveis (Silva *et al.*, 2016).

2.8.2 Ácido ascórbico

O ácido ascórbico é uma vitamina hidrossolúvel presente naturalmente nos alimentos, principalmente em frutas e diversos vegetais. A vitamina C foi denominada de ácido ascórbico devido ao fato de ser eficaz contra o escorbuto, doença que comprometia principalmente os marinheiros em longas viagens, causando inflamações de gengivas, perdas dos dentes e hemorragias em virtude do rompimento das paredes dos vasos sanguíneos, podendo levar à morte (Dantas *et al.*, 2012).

A vitamina C é um carboidrato encontrado nos alimentos sob duas formas fisiologicamente ativas: a forma reduzida (ácido L-ascórbico) e a forma oxidada (ácido L-desidroascórbico) (Anderson *et al.*, 1988). O ácido ascórbico é um sólido branco, muito solúvel em água, sendo relativamente estável no estado sólido. Em solução, ele é facilmente oxidado a ácido L-desidroascórbico em virtude da presença do grupo redutona, o qual é fortemente

reductor. Durante o processamento, a contaminação por íons metálicos (Cu^{2+} , Fe^{3+}) ocasiona o aumento da oxidação do ácido ascórbico para o ácido L-desidroascórbico, sendo este convertido em ácido dicetogulônico (Figura 2.9) que após desidratação e descarboxilação resulta em furfural. Pigmentos escuros são formados pela reação de polimerização subsequente (Ribeiro & Seravalli, 2007).

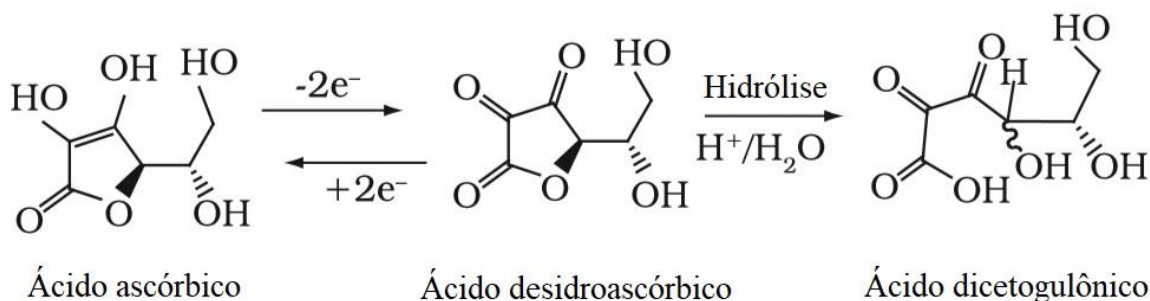


Figura 2.9 - Reação de oxidação do ácido ascórbico. Fonte: Rosa *et al.* (2007).

Nas plantas, onde é particularmente abundante, exerce a função de tampão redox e cofator enzimático, além de estar associado à fotossíntese (Dantas *et al.*, 2012). Na literatura, vários pesquisadores destacaram diferentes ações do ácido ascórbico como, por exemplo, na fotoproteção (Muller-Moule *et al.* 2004), funções em processos redox que estão relacionadas com o crescimento celular e respostas hormonais (Pignocchi & Foyer, 2003), além de respostas programadas de morte celular, senescência e patógeno (Conklin, 2001, Pastori *et al.* 2003; Barth *et al.* 2004, Chen & Gallie 2004; Vacca *et al.* 2004).

O ácido ascórbico, além do seu papel nutricional, está envolvido na neurotransmissão sináptica, na defesa antioxidante no sistema nervoso central e também desempenha um papel terapêutico no manejo de transtornos do humor (Moretti *et al.*, 2013; Wang; *et al.*, 2013; Sahraian *et al.*, 2015). Guatam *et al.* (2012) destacaram em sua pesquisa que pacientes com transtornos de ansiedade generalizados e depressão apresentaram níveis séricos significativamente mais baixos de vitaminas A, C e E em comparação com controles saudáveis. Algumas evidências sustentam a ideia de que o mecanismo pelo qual o ácido ascórbico exerce proteção no distúrbio neuropsiquiátrico envolve, pelo menos em parte, suas propriedades antioxidantes e capacidade de melhorar a síntese dos hormônios noradrenalina e neuropeptídeos (Cocchi *et al.*, 1980; Meredith & May, 2013).

A vitamina C, por ser um antioxidante natural presente nos alimentos, pode ter papel fundamental de proteção das moléculas contra danos oxidativos causados por espécies de oxigênio reativo, as quais podem modificar as moléculas de lipoproteína de baixa densidade (LDL), desencadeando sequências de eventos que levam ao aparecimento e progressão de arteriosclerose e outras doenças cardiovasculares (Nissen *et al.*, 2005). Além disso, a vitamina C pode contribuir para a prevenção de doenças cardiovasculares, como também atuar na regeneração da forma reduzida da vitamina E, a qual é considerada uma das principais vitaminas lipossolúveis (Kaliyora *et al.*, 2006, Nagaoka *et al.*, 2007).

2.8.3 Carotenoides

Os carotenoides estão amplamente distribuídos na natureza, na forma de misturas simples de alguns compostos ou como misturas muito complexas. Fazem parte do grupo dos terpenos e apresentam-se sob a forma de cadeias hidrocarbonadas compostas por oito unidades de isoprenos (tetraterpenos; C₄₀ - 40 moléculas de carbono). Os carotenoides derivam da via metabólica do ácido mevalônico, da mesma forma que todos os compostos do grupo dos terpenos (Belitz *et al.*, 2009). Em frutas, são formadas grandes quantidades de carotenoides durante a maturação a partir da presença de luz, sendo os α e β -caroteno, os quais não possuem a molécula de oxigênio em sua estrutura, e xantofilas, que apresentam uma ou mais moléculas de oxigênio, os mais frequentes (Huck *et al.*, 2000; Jackson *et al.*, 2008).

Os carotenoides estão dentre os pigmentos naturais de maior ocorrência, já foram caracterizados mais de 600 tipos diferentes e, dentre eles, o β -caroteno é o de maior destaque (Olson & Krinsky, 1995). Os carotenoides são compostos lipofílicos e, portanto, são solúveis em solventes orgânicos. As cores atrativas, que variam do amarelo claro até o vermelho escuro, são devido às ligações duplas conjugadas que ocorrem ao longo da cadeia hidrocarbonada. As ligações duplas podem ocorrer na forma *cis* ou *trans*, sendo a última a mais frequente na natureza. Compostos com todas as ligações em *trans* exibem uma coloração mais escura e à medida que ocorre um aumento das ligações em *cis* é observado um enfraquecimento gradual da cor (Ribeiro & Seravalli, 2007). O cromóforo (absorvedor de luz) constituído pelo sistema de ligações simples e duplas alternadas proporciona o espectro de absorção visível, o qual é utilizado para identificar e quantificar os carotenoides (Zaghdoudi *et al.*, 2015). Sendo moderadamente estáveis ao calor e susceptíveis à oxidação, podem ser facilmente isomerizados

pela aplicação de temperaturas elevadas, ácido ou luz. Na indústria, etapas de processamento e estocagem podem também provocar a isomerização dos carotenoides contidos nos alimentos e resultar em uma alteração de cor.

Os carotenoides são precursores da vitamina A e conhecidos por possuírem propriedades antioxidantes (Damodaram *et al.*, 2010), já que são capazes de desativar o oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$) e outras espécies reativas (Ribeiro & Seravalli, 2007). O acúmulo desses componentes no corpo humano resulta em estresse oxidativo que pode desencadear os processos patogênicos de muitas doenças e, devido a isso, alimentos que apresentem propriedades antioxidantes são de relevante importância para o organismo (Fiedor & Burda, 2014). Os carotenoides podem prevenir a ocorrência de diferentes tipos de câncer, retardar o estabelecimento de doenças crônico-degenerativas, promover a melhoria da qualidade e expectativa de vida, além de suprir os requisitos nutricionais básicos (Agostini-Costa *et al.*, 2010).

Capítulo 3

Materiais e métodos

3 Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e as metodologias empregadas para a execução de todas as etapas deste trabalho.

3.1 Materiais

Ameixas frescas, variedade Constanza, foram adquiridas no mercado local (Rio Grande do Norte, Brasil). Os frutos foram lavados, cortados para retirada do caroço, processados como polpa (triturados em liquidificador) e acondicionados em sacos apropriados (polipropileno) (Figura 3.1). Não houve adição de água durante o processamento. Com o intuito de proporcionar estabilidade microbiológica, o material foi resfriado e estocado a $\pm 10^{\circ}\text{C}$ para uso posterior. A albumina de ovo utilizada na formulação da espuma de ameixa foi adquirida da empresa Naturovos (Rio Grande do Sul, Brasil).

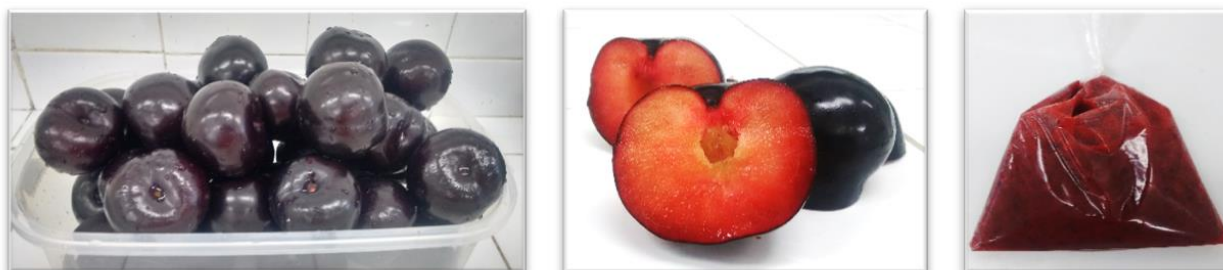


Figura 3.1 - Preparação da polpa de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.

3.2 Planejamento experimental

Para a execução deste trabalho, foi selecionado o planejamento experimental fatorial completo 3^2 com três réplicas no ponto central, sendo aplicado em duas partes do estudo: na primeira etapa, para investigar o efeito do tempo de batimento e concentração de albumina de ovo nas propriedades físicas, térmicas e de secagem da espuma de ameixa e, na segunda etapa, para avaliar a secagem da espuma otimizada em condições variadas de temperatura e espessura.

Esta estrutura foi selecionada porque inclui todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento, inclusive o ponto central, ou seja, são obtidos dados referentes a duas variáveis independentes em três níveis (-1, 0, +1).

Os níveis selecionados e a matriz completa do planejamento 3^2 executado na primeira etapa deste trabalho são mostrados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente. As variáveis independentes são: tempo de batimento (min) e concentração de albumina (% p/p) e as dependentes são: densidade da espuma (g/cm^3), propriedades térmicas - condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$) e capacidade térmica ($\text{MJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$) - e tempo de secagem (min). As condições de processo otimizadas para a preparação da espuma obtidas a partir da matriz do planejamento experimental exposto na Tabela 3.2 serão utilizadas nas etapas seguintes deste estudo.

Tabela 3.1 - Níveis das variáveis independentes (concentração de albumina e tempo de batimento)

Variáveis independentes	Codificação dos níveis		
	-1	0	+1
Concentração de albumina (% p/p)	3	5	7
Tempo de batimento (min)	6	10	14

Tabela 3.2 - Planejamento experimental fatorial completo 3². Variáveis independentes: tempo de batimento e concentração de albumina

Experimento	Tempo de batimento (min)	Concentração de albumina (% p/p)
1	6 (-1)	3 (-1)
2	10 (0)	3 (-1)
3	14 (+1)	3 (-1)
4	6 (-1)	5 (0)
5	10 (0)	5 (0)
6	14 (+1)	5 (0)
7	6 (-1)	7 (+1)
8	10 (0)	7 (+1)
9	14 (+1)	7 (+1)
10	10 (0)	5 (0)
11	10 (0)	5 (0)
12	10 (0)	5 (0)

Os níveis das variáveis independentes e a matriz dos experimentos aplicados na segunda etapa do trabalho para analisar a influência da espessura da camada de espuma e da temperatura do ar de secagem sobre propriedades do pó e parâmetros do processo são mostrados nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Tabela 3.3 - Níveis das variáveis independentes (espessura da camada de espuma e temperatura do ar de secagem)

Variáveis independentes	Codificação dos níveis		
	-1	0	+1
Espessura da camada de espuma (cm)	0,8	1,3	1,8
Temperatura do ar de secagem (°C)	60	70	80

As variáveis independentes são: espessura da camada de espuma (cm) e temperatura do ar de secagem (°C) e as dependentes selecionadas foram: tempo de secagem (min), taxa de secagem média ((g água/g pó seco)/min), atividade de água e umidade do pó (g água/100 g pó seco).

Tabela 3.4 - Planejamento experimental fatorial completo 3². Variáveis independentes: espessura da camada de espuma e temperatura do ar de secagem

Experimento	Espessura da camada de espuma (cm)	Temperatura do ar de secagem (°C)
1	0,8 (-1)	60 (-1)
2	1,3 (0)	60 (-1)
3	1,8 (+1)	60(-1)
4	0,8 (-1)	70 (0)
5	1,3 (0)	70 (0)
6	1,8 (+1)	70 (0)
7	0,8 (-1)	80 (+1)
8	1,3 (0)	80 (+1)
9	1,8 (+1)	80 (+1)
10	1,3 (0)	70 (0)
11	1,3 (0)	70 (0)
12	1,3 (0)	70 (0)

Para todos os planejamentos aplicados, os experimentos foram executados de forma aleatória. Os efeitos das variáveis independentes nas respostas do processo foram avaliados estatisticamente em um intervalo de confiança de 95% ($p \leq 0,05$), utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulssa, Oklahoma, Estados Unidos).

3.3 Preparação da espuma de ameixa

Para a preparação de cada espuma, uma massa fixa de 150 gramas contendo ameixa e albumina de ovo foi colocada em um recipiente. A formação da espuma foi feita usando um misturador com potência de 150 W (Figura 3.2). Foi aplicado o planejamento experimental fatorial completo 3^2 , cujas variáveis independentes foram: concentração de albumina e tempo de batimento, conforme Tabela 3.1, cujos valores dos níveis foram selecionados a partir de testes preliminares. Fases posteriores deste trabalho foram realizadas utilizando a condição otimizada da espuma obtida a partir do estudo realizado com base no planejamento experimental da Tabela 3.2.



Figura 3.2 - Preparação da espuma de ameixa. (A) Polpa de ameixa pura; (B) Polpa de ameixa + albumina de ovo; (C) Espuma de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.

3.4 Determinação das propriedades da espuma

3.4.1 Densidade da espuma

Para determinação da densidade da espuma, a amostra foi colocada em um cilindro graduado a temperatura ambiente (23°C – 26°C). A transferência da espuma para o recipiente graduado foi feita cuidadosamente para evitar a destruição da sua estrutura e a evacuação do ar aprisionado (Karim & Wai, 1999). As amostras foram pesadas, aferindo-se o volume ocupado pela espuma no recipiente graduado. Calculou-se a densidade da espuma (ρ_e) de acordo com a Equação 3.1.

$$\rho_e = \frac{\text{massa da espuma}(g)}{\text{volume da espuma}(cm^3)} \quad (3.1)$$

3.4.2 Expansão da espuma

A expansão da espuma determina a quantidade de ar incorporado durante o batimento para sua formação (Sangamithra *et al.*, 2016). A expansão da espuma foi calculada a partir da Equação 3.2, usando a relação entre a densidade da espuma de ameixa (ρ_e) e a densidade da polpa de ameixa (ρ_p) (Oguntunde & Adejo, 1993).

$$\% \text{ Expansão da espuma} = \frac{\frac{1}{\rho_e} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{1}{\rho_p}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

3.4.3 Porosidade da espuma

A porosidade de cada espuma foi calculada a partir da Equação 3.3, baseando-se na densidade da espuma e da polpa, previamente determinadas (Raharitsifa *et al.*, 2006).

$$\phi = 1 - \rho_e/\rho_p \quad (3.3)$$

Onde ρ_e e ρ_p são as densidades da espuma e da polpa de ameixa (g/cm³), respectivamente. A Eq. 3.3 é válida se a densidade do ar é negligenciada em relação à densidade

da polpa. Para este trabalho, a densidade determinada para a polpa de ameixa foi de $0,97 \pm 0,007$ g/cm³.

3.4.4 Volume drenado

O método de drenagem de espuma é aplicado para verificar a força das lamelas de espuma em termos do volume de líquido drenado em um dado momento (Balasubramanian *et al.*, 2012). Neste estudo, foi aplicado o método de Sauter & Montoure (1972) realizado com modificações. A espuma de ameixa foi colocada em um funil com gaze montado sobre um cilindro graduado de 10 mL, conforme Figura 3.3. A amostra coletada após uma hora foi quantificada e relatada como o volume drenado (Azizpour *et al.*, 2014).



Figura 3.3 - Análise de volume drenado da espuma de ameixa. Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.5 Determinação das propriedades térmicas da espuma

As propriedades térmicas (condutividade térmica, capacidade térmica) da espuma foram analisadas logo após a sua formação a fim de que os resultados não fossem prejudicados por possível coalescência da espuma. O KD2 Pro Thermal Properties Analyzer (Decagon, USA) foi utilizado para analisar condutividade térmica e capacidade térmica da espuma de ameixa. A determinação das propriedades térmicas foi realizada em duplicata.

3.5 Secagem em camada de espuma

As espumas preparadas de acordo com o planejamento experimental para cada etapa do trabalho foram desidratadas usando a técnica de secagem em camada de espuma. Para a execução das diferentes fases desta pesquisa, foi utilizada uma estufa de recirculação de ar (Tecnal, Brasil), cuja velocidade do ar é 2 m/s, medida através do anemômetro (Modelo AD-250, Instrutherm, Brasil). As espumas de ameixa foram espalhadas uniformemente em bandejas de alumínio com dimensões (comprimento x largura x espessura) especificadas.

Para o estudo realizado na primeira parte desta pesquisa, foi selecionada a bandeja de alumínio com as dimensões 36,9 x 21,8 x 0,8 cm por ser a de menor espessura e a temperatura do ar de secagem foi fixada em 70 °C por ser a temperatura média aplicada em outros estudos sobre secagem de frutas pelo método de camada de espuma. No estudo seguinte, foram usadas três bandejas de alumínio com dimensões distintas (36,9 x 21,8 x 0,8 cm; 25,0 x 19,9 x 1,3 cm e 24,2 x 14,8 x 1,8 cm), mas com volumes praticamente equivalentes (643,5; 646,7 e 644,7 cm³, respectivamente) com o intuito de avaliar a influência da espessura da camada da espuma e de três temperaturas do ar de secagem (60, 70 e 80 °C) sobre o processo. Por fim, os experimentos realizados na terceira parte deste trabalho foram conduzidos utilizando a bandeja com menor espessura e temperaturas do ar de 50, 60, 70 e 80 °C. Ao término de cada secagem, o material seco foi raspado da bandeja e transformado em pó por trituração (Figura 3.4). Após essa etapa, foi acondicionado em saco plástico e mantido em *freezer*.



Figura 3.4 - Pó de ameixa obtido por secagem em camada de espuma. Fonte: Arquivo pessoal.

3.5.1 Cinética de secagem das espumas e taxa de secagem

A cinética de secagem foi acompanhada pela perda de massa da espuma. A bandeja contendo a amostra de espuma foi pesada a cada 5 minutos até atingir massa constante. A razão de umidade (RU) foi calculada a partir da Equação 3.4.

$$RU = \frac{U(t) - U_e}{U_0 - U_e} \quad (3.4)$$

onde U_0 , $U(t)$ e U_e representam a umidade da espuma (g/g base seca) no tempo inicial, no tempo t e no equilíbrio, respectivamente. Considerou-se a umidade de equilíbrio como o valor da umidade do material ao atingir peso constante, ou seja, quando a taxa de secagem é nula.

A taxa de secagem foi calculada pela Equação 3.5:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{U_t - U_{t+1}}{t_s} \quad (3.5)$$

onde U_t e U_{t+1} (g água/g pó seco) são o teor de umidade no tempo t e no próximo intervalo de tempo durante a secagem, respectivamente e t_s (s) é o intervalo de tempo de secagem determinado entre duas medições.

3.5.2 Difusividade efetiva e energia de ativação

A equação da difusão de Fick (Crank, 1975) foi usada como modelo matemático para avaliar a cinética da secagem em camada de espuma. A geometria de placa plana foi considerada no modelo, de acordo com a Equação 3.6 (Doymaz, 2006):

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (3.6)$$

Onde D_{eff} é a difusividade efetiva (m^2/s), t é o tempo de secagem (min), L é a espessura da bandeja (m) e n é o número de termos da série na solução.

Para a escolha da quantidade de termos da série, foram realizados testes até o sétimo termo, sendo evidenciado que a partir do quarto termo não houve diferença considerável entre os valores fornecidos. Em virtude disso, foram aplicados os quatro primeiros termos da série ($n=4$), ajustando-se o modelo ao conjunto de dados da razão de umidade em função do tempo para cada experimento. Utilizou-se o programa Statistics 7.0 para ajuste do modelo, determinando-se a difusividade efetiva, que é o parâmetro desconhecido do modelo.

O efeito da temperatura na difusividade efetiva é geralmente expressa usando uma equação do tipo Arrhenius, conforme a Equação 3.7 a seguir (Salahi *et al.*, 2015):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3.7)$$

onde D_0 é a constante na equação de Arrhenius (m^2/s), E_a é a energia de ativação (kJ/mol), R é a constante universal dos gases (kJ/mol.K) e T é a temperatura absoluta (K). A energia de ativação foi calculada a partir da linearização da Equação 3.7.

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) + \ln\left(\exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)\right) \quad (3.8)$$

$$\ln(D_{eff}) = \frac{-E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln(D_0) \quad (3.9)$$

A Equação 3.9 é semelhante a equação da reta ($y = a.x + b$) e plotando-se $\ln(D_{eff})$ *versus* o inverso da temperatura absoluta ($1/T$), encontra-se a inclinação da reta que corresponde ao termo $\frac{-E_a}{R}$, de onde se calcula a estimativa do parâmetro E_a . O coeficiente b determinado pela regressão com a equação da reta corresponde ao termo $\ln(D_0)$, de onde se calcula a estimativa do parâmetro D_0 .

3.6 Liofilização

A etapa de liofilização foi realizada com o intuito de comparar o pó liofilizado com o pó obtido por secagem em camada de espuma, uma vez que o processo de liofilização é indicado para a preservação das propriedades físico-químicas do alimento e das substâncias sensíveis à temperatura como vitaminas e compostos bioativos.

O processo foi realizado em liofilizador (Modelo L101 Liobras, Brasil) sob as seguintes condições operacionais: velocidade constante de 1 mm/h, vácuo de 0,5 mmHg e pressão final de 0,05 mmHg. Cerca de 300 g de polpa de ameixa pura (não espumada, sem adição de albumina de ovo) foi colocada em bandeja inox e congelada por 24 h a -18 °C. Em seguida, foi liofilizada por 72 h a -40 °C (Figura 3.5).

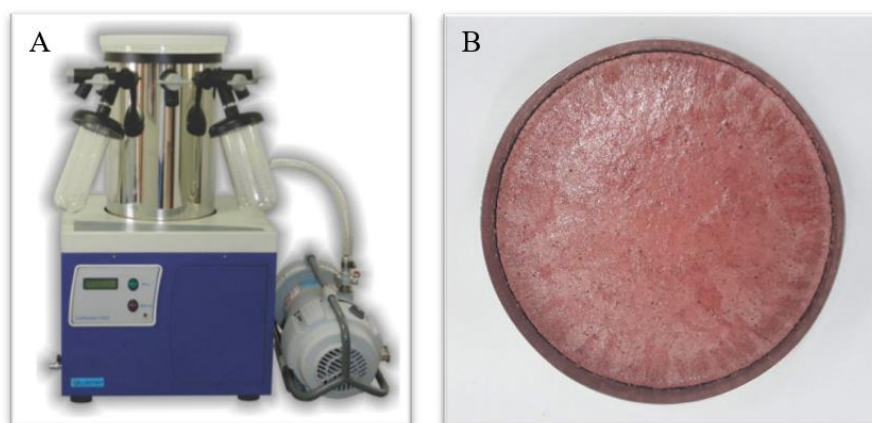


Figura 3.5 - Liofilização. (A) Liofilizador utilizado na pesquisa; (B) Polpa de ameixa após a liofilização. Fonte: (A) Manual (2012) e (B) Arquivo pessoal.

3.7 Ajuste de modelos matemáticos

Para selecionar um modelo adequado para descrever o processo de secagem de espuma de ameixa foram aplicados onze modelos de secagem em camada delgada, como mostrado na Tabela 3.5. O software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulssa, Oklahoma, Estados Unidos) foi utilizado para a realização das análises de regressão não-linear. Critérios como o coeficiente de determinação (R^2), o qui-quadrado reduzido (χ^2) e a raiz do quadrado médio residual (RQMR) foram utilizados para avaliar o ajuste de um modelo aos dados experimentais.

Tabela 3.5 - Modelos matemáticos para secagem em camada delgada

Modelos	Equações	Referências
Newton	$RU = \exp(-k.t)$	O'Callaghan <i>et al.</i> , 1971
Hendersen e Pabis	$RU = a.\exp(-k.t)$	Henderson e Pabis, 1961
Logarítmico	$RU = a.\exp(-k.t) + c$	Yaldiz e Ertekin, 2001
Page	$RU = \exp(-k.t^n)$	Page, 1949; McMinn, 2006
Midilli	$RU = a.\exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli <i>et al.</i> , 2002
Distribuição de Weibull	$RU = a - b.\exp(-k.t^n)$	Azizpour <i>et al.</i> , 2014
Dois termos	$RU = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-n.t)$	Sharaf-Eldeen <i>et al.</i> , 1980
Verma	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-n.t)$	Verma <i>et al.</i> , 1985
Dois termos exponencial	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.a.t)$	Sharaf-Eldeen <i>et al.</i> , 1980
Aproximação por difusão	$RU = a.\exp(-k.t) + (1-a).\exp(-k.b.t)$	Yaldiz e Ertekin, 2001
Wang e Singh	$RU = 1 + (a.t) + (b.t^2)$	Wang e Singh, 1978

RU é a razão de umidade; k é constante de secagem (min^{-1}); a, b, c e n são os parâmetros dos modelos; t é o tempo de secagem (min).

Para medir a diferença entre os valores preditos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente, utilizam-se os valores de RQMR. O RQMR representa a capacidade do modelo de se ajustar aos dados experimentais (Franco *et al.*, 2017). Já o qui-quadrado reduzido fornece uma medida de confiabilidade do modelo independentemente do número de parâmetros, uma vez que considera o número de constantes apresentadas no modelo (McMinn, 2006). Quanto mais baixos os valores calculados de qui-quadrado reduzido e da raiz do quadrado médio residual, melhor será a capacidade do modelo para representar os dados experimentais.

Modelos com maiores valores de R^2 e menores valores de χ^2 e RQMR foram selecionados como um bom ajuste para os dados experimentais, sendo os dois últimos calculados de acordo com as Equações (3.8) e (3.9), respectivamente (Franco *et al.*, 2017).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pre,i})^2}{N-n} \quad (3.8)$$

$$RQMR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RU_{exp,i} - RU_{pre,i})^2}{N}} \quad (3.9)$$

Em que $RU_{exp,i}$ é a i -ésima razão de umidade experimental; $RU_{pre,i}$, a i -ésima razão de umidade predita pelo modelo ajustado; N , o número de observações; e n , o número de parâmetros no modelo.

3.8 Coeficientes de transporte e números adimensionais de transferência de calor e massa

Os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, h e h_m , respectivamente, foram obtidos de acordo com Holman (1996) (Equações 3.15 e 3.16) usando os números adimensionais dados pelas Equações 3.12 e 3.14 (Incropera e Dewitt, 1990). Com os valores dos coeficientes h e h_m , condutividade térmica e difusividade efetiva da espuma foram estimados os números de Biot para transferência de calor e massa pelas equações 3.17 e 3.18:

$$D_{AB} = \frac{2,3056 \times 10^{-5} \cdot 9,81 \times 10^4}{p} \left(\frac{T+273}{273} \right)^{1,81} \quad (3.10)$$

$$Re = \frac{\rho_{\infty} \cdot v_{\infty} \cdot d}{\mu_{\infty}} \quad (3.11)$$

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.12)$$

$$Sc = \frac{\mu_{\infty}}{\rho_{\infty} \cdot D_{AB}} \quad (3.13)$$

$$Sh = 0,664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (3.14)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\infty}}{d} \quad (3.15)$$

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{d} \quad (3.16)$$

$$Bi = \frac{h \cdot d}{k} \quad (3.17)$$

$$Bi_m = \frac{h_m \cdot d}{D_{AB}} \quad (3.18)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), p é a pressão (Pa), Re , Nu , Pr , Sh , Sc , Bi e Bi_m são os números adimensionais de Reynolds, Nusselt, Prandtl, Sherwood, Schmidt, Biot para transferência de calor e Biot para transferência de massa, respectivamente, ρ_{∞} , ν_{∞} , μ_{∞} e k_{∞} são a densidade (g/cm^3), velocidade (m/s), viscosidade dinâmica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) e condutividade térmica do ar ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), respectivamente, D_{AB} é o coeficiente de difusão binária (água-ar) (m^2/s), k é a condutividade térmica da espuma de ameixa ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) e d é o comprimento característico da camada (m), o qual depende da superfície em que ocorrem fluxos convectivos. Como o número de Biot correlaciona as transferências de calor e massa entre o meio e o material sólido, o comprimento característico d (m) é definido pela razão entre o volume do sólido e sua área superficial de troca térmica e de massa. Para o caso da secagem da espuma a área relativa ao transporte de massa é apenas a que se encontra em contato direto com o ar, enquanto para o transporte de calor a área da base da placa de alumínio também deve ser considerada e a resistência a condução através da mesma é desprezível. Desta forma, o comprimento característico para a transferência de massa corresponde a espessura da placa e para a transferência de calor metade deste valor.

3.9 Análise estatística

Nesta pesquisa, foram realizadas análises estatísticas utilizando o Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulssa, Oklahoma, Estados Unidos). para estabelecer o nível de correlação entre as variáveis e para realizar a otimização de parâmetros do processo. Para isso, foi aplicada a correlação de Pearson e a função conveniência (ou método *desirability*). Foi aplicado também o teste de Tukey para comparação das médias.

3.9.1 Correlação entre variáveis

Para analisar o nível de correlação entre as variáveis, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson (r), que mensura, através de uma associação linear, o grau de relacionamento entre duas variáveis quantitativas. Para Dancey & Reidy (2006), o coeficiente de correlação de Pearson (r) é considerado forte para r maior do que 0,70. Quanto mais próximo de 1, maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis, não importando se a relação é positiva ou negativa e quanto mais próximo de zero, mais fraca é a relação (Figueiredo Filho & Silva Júnior, 2009).

3.9.2 Função conveniência ou método *desirability*

A otimização numérica das variáveis operacionais do processo foi realizada com o objetivo de encontrar os níveis otimizados de fatores independentes utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft Inc. South América, Toulusa, Oklahoma, Estados Unidos). Os objetivos desejados para cada variável e resposta foram escolhidos. Todas as variáveis independentes foram mantidas dentro da faixa experimental (Tabelas 3.1 e 3.3) e as respostas foram minimizadas ou maximizadas conforme análise. Uma função composta geral, denominada função de conveniência ou método *desirability* ($D(x)$), foi resolvida para otimizar várias respostas ao mesmo tempo. A equação é dada da seguinte forma:

$$D(x) = ((d_1 \cdot x) \cdot (d_2 \cdot x) \dots (x \cdot d_n))^{1/2} \quad \text{Eq. (3.8)}$$

Onde d_i ($i = 1, 2, \dots, n$) são respostas e n é o número total de respostas do estudo.

O valor de $D(x)$ varia de zero a um. A otimização numérica encontra um ponto que maximiza o valor da função desejável. Existe a possibilidade de dois ou mais máximos devido à curvatura nas superfícies de resposta. Partindo de vários pontos no espaço, as chances de encontrar o melhor máximo local são aprimoradas.

3.10 Análises das propriedades do pó

Os pós de ameixa produzidos foram submetidos às análises de densidade aparente e compactada, densidade absoluta, fluidez e coesão do pó, acidez total titulável, atividade de água, umidade, higroscopicidade, solubilidade, proteína, lipídeos, cinzas, fibra bruta, determinação dos compostos fenólicos, determinação do ácido ascórbico, carotenoides, sequestro dos radicais DPPH e ABTS, atividade antioxidante total e atividade quelante.

3.10.1 Densidade aparente e compactada

A densidade aparente foi determinada adicionando-se 5 g do pó em um cilindro graduado de 10 mL. A proveta foi pesada e o volume ocupado pelo pó foi medido sem compactação do mesmo. A densidade do pó compactado foi determinada deixando a proveta anteriormente pesada cair sucessivamente de uma altura de 20 cm sobre uma superfície horizontal emborrachada, até que não se observasse variação no volume ocupado pelo pó no recipiente (Chegini & Ghobadian, 2005). A densidade aparente e a densidade compactada foram calculadas usando as Equações 3.19 e 3.20, respectivamente:

$$\text{Densidade aparente } (\rho_a) = \frac{\text{Massa do pó de ameixa (g)}}{\text{Volume do pó de ameixa (cm}^3\text{)}} \quad (3.19)$$

$$\text{Densidade compactada } (\rho_c) = \frac{\text{Massa do pó de ameixa (g)}}{\text{Volume do pó de ameixa compactado (cm}^3\text{)}} \quad (3.20)$$

3.10.2 Densidade absoluta

A densidade absoluta (ρ_{abs}) das partículas de ameixa em pó foi calculada a partir do método de Caparino *et al.* (2012) com algumas modificações. Amostras de 2 a 3 g do pó foram colocadas em uma proveta vazia e o volume total foi preenchido com uma quantidade controlada de tolueno, o qual foi utilizado por conseguir preencher os poros extremamente conectados à superfície do material sem provocar a dissolução da amostra. O volume total de

sólidos é obtido pela diferença entre o valor mensurado na proveta e o volume de tolueno gasto. O valor da densidade absoluta foi calculado a partir da Equação 3.21.

$$\text{Densidade absoluta } (\rho_{abs}) = \frac{\text{Massa do pó de ameixa (g)}}{\text{Volume total de sólidos (cm}^3\text{)}} \quad (3.21)$$

3.10.3 Fluidiez e coesão do pó

A fluidiez e a coesão dos pós foram avaliadas em termos de índice de Carr (IC) e razão de Hausner (RH), respectivamente (Tze *et al.* 2012). O IC (Carr 1965) e RH (Hausner, 1967) foram calculados usando as Equações 3.22 e 3.23, respectivamente:

$$\text{Índice de Carr (IC)} = 100 \times \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \quad (3.22)$$

$$\text{Razão de Hausner (RH)} = \frac{\rho_c}{\rho_a} \quad (3.23)$$

Onde ρ_a e ρ_c representam as densidades aparente e compactada (g/cm^3), respectivamente.

A Tabela 3.6 indica a classificação da fluidiez do pó com base nas faixas de IC e RH.

Tabela 3.6 - Classificação de fluidez e coesão do pó baseada no índice de Carr e na razão de Hausner

Índice de Carr (%)		Razão de Hausner	
Fluidez	Parâmetro	Coesão	Parâmetro
Muito boa	< 15%	Alta	> 1,4
Boa	15 – 20%		
Regular	20 – 35%	Intermediária	1,2 – 1,4
Ruim	35 – 45%		
Muito ruim	> 45%	Baixa	< 1,2

Fonte: Jinapong *et al.* (2008).

3.10.4 Acidez total titulável

Como a ameixa apresenta coloração rosada, foi utilizado o método de determinação da acidez total titulável por volumetria potenciométrica, conforme as Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (2008). O método baseia-se na titulação potenciométrica da amostra com solução de hidróxido de sódio onde se determina o ponto de equivalência pela medida do pH da solução.

O potenciômetro foi calibrado com as soluções-tampão de 4 e 7 de acordo com as instruções do fabricante. Foi pesado 1 g da amostra e diluído com 50 mL de água. Agitou-se moderadamente e o eletrodo foi mergulhado na solução. Titulou-se com a solução de hidróxido de sódio 0,1 M até uma faixa de pH (8,2-8,4). A acidez titulável foi calculada conforme a Equação 3.24. Os resultados foram expressos em gramas de ácido málico por 100 g da amostra.

$$\text{Acidez total titulável} = \frac{M_{\text{NaOH}} \cdot F_c \cdot V_{\text{NaOH}} \cdot \text{Eq}_{\text{ácido}}}{10 \cdot m_{\text{pó}}} \quad (3.24)$$

Onde M_{NaOH} , V_{NaOH} e F_c representam a molaridade (mol/L), o volume (mL) e o fator de correção do hidróxido de sódio, respectivamente; $E_{\text{ácido}}$ é o equivalente ácido para o ácido málico (67,04) e $m_{\text{pó}}$ é a massa do pó de ameixa utilizada (g).

3.10.5 Atividade de água

As amostras foram transferidas para cápsulas de polietileno, com diâmetro interno de 3,8 cm para determinação de atividade de água em medidor de atividade Aqua Lab (modelo 3TE, Decagon Devices, Pullman, EUA), na temperatura de 25°C.

3.10.6 Higroscopicidade

A higroscopicidade foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Cai & Corke (2000), com algumas modificações, baseadas no estudo de Tonon *et al.* (2010) e descritas na sequência. Colocou-se aproximadamente 1 g de cada amostra em um recipiente hermético contendo uma solução saturada de NaCl 40% (umidade relativa de 75,29%) a 25°C e, após uma semana, as amostras foram pesadas.

Os níveis para classificação do pó são exibidos na Tabela 3.7. A higroscopicidade foi expressa como g de umidade adsorvida por 100 g de massa seca da amostra ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$).

Tabela 3.7 - Classificação dos pós quanto à higroscopicidade

Higroscopicidade	
Não higroscópico	< 10%
Ligeiramente higroscópico	10,1 – 15%
Higroscópico	15,1 – 20%
Muito higroscópico	20 – 25%
Extremamente higroscópico	> 25%

Fonte: GEA Niro Research Laboratory (2017).

3.10.7 Umidade

A umidade do pó foi determinada de forma direta, utilizando 1 g de pó em balança de umidade de infravermelho (MARTE ID-200).

3.10.8 Solubilidade

Foi determinada pelo método de Cano-Chauca *et al.* (2005) com modificações. Diluiu-se 1 g da amostra em pó em 100 mL de água destilada, sob agitação mecânica de 2500 rpm por 5 minutos. As soluções foram transferidas para tubos e centrifugadas a 2600 rpm por 5 minutos. Alíquotas do sobrenadante (20 mL) foram transferidas para pesa-filtros, previamente tarados e submetidas à secagem em estufa a 70°C por 24 horas. O percentual de solubilidade foi calculado da Equação 3.25.

$$\% \text{ Solubilidade} = \frac{m_{\text{amostra final}} \cdot (100 + m_{\text{pó}})}{m_{\text{amostra inicial}} \cdot m_{\text{pó}}} \quad (3.25)$$

Onde $m_{\text{amostra inicial}}$ representa a massa da amostra antes da secagem (g), $m_{\text{amostra final}}$ é a massa da amostra após 24 horas (g) e $m_{\text{pó}}$ é a massa do pó de ameixa (g).

3.10.9 Proteína

O teor de proteína foi determinado pelo método Kjeldahl de acordo com o método N° 920.152 (AOAC, 1998). Inicialmente, as amostras dos pós foram digeridas (Bloco digestor de nitrogênio CT 351/352, Tecnal, Brasil) em ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,02 N. Em seguida, foram destiladas utilizando hidróxido de sódio (NaOH) 40%, cuja amônia liberada na destilação foi inserida em uma solução de ácido bórico, formando o borato de amônio ((NH₄)₃BO₃), o qual foi titulado com ácido clorídrico (HCl) 0,1 N. O teor de nitrogênio (%) foi calculado através da Equação 3.26.

$$\% \text{ Proteína bruta} = \frac{(V' - V) \cdot Fc \cdot N \cdot 6,25 \cdot 0,014}{m} \times 100 \quad (3.26)$$

V' = volume de HCl 0,1 N gasto na titulação;

V = volume de HCl 0,1 N gasto no teste em branco;

F_c = fator de correção do HCl 0,1 N;

N = normalidade;

m = massa da amostra (g);

6,25 = fator de conversão do nitrogênio em proteínas;

0,014 = miliequivalente-grama do nitrogênio.

3.10.10 Lipídeos

O procedimento foi realizado de acordo com o método 963.15 (AOAC, 1998). Foram pesados 5 g da amostra em papel manteiga e transferidos para utensílios de vidro acondicionados em destilador (Tecnal, Modelo TE-044, Brasil) com 100 mL de éter de petróleo. A extração foi realizada com a amostra mergulhada no éter de petróleo por 90 minutos. Em seguida, foi realizado o processo de lavagem durante 30 minutos a 180 ° C. A gordura extraída das amostras foi levada a estufa para evaporação do éter de petróleo residual. O éter de petróleo foi recuperado, em seguida, e guardado em recipiente apropriado. Após a retirada da estufa, esperou-se o extrato gorduroso resultante esfriar por 30 minutos no dessecador, seguido da pesagem. O percentual de extrato etéreo foi calculado pela Equação 3.27:

$$EE \% = \frac{m_3 - m_1}{m_2} \quad (3.27)$$

Onde:

m_1 = massa do balão (g);

m_2 = massa da amostra seca (g);

m_3 = massa do balão com o extrato etéreo (g).

3.10.11 Cinzas

Para o cálculo do resíduo mineral (cinzas) das amostras foi utilizada a metodologia recomendada pela AOAC (1998) método 940.26. Cadinhos previamente higienizados e identificados foram colocados na estufa (Tecnal, Brasil) por 1 hora. Após serem deixados em dessecador para esfriar por 60 minutos, foram pesados e houve a adição de 3 g de amostra. Em seguida, foram colocados em uma mufla a 600 °C por 4 horas. Passado esse tempo, foram retirados e deixados em dessecador por 60 minutos para esfriar e serem pesados em seguida. O percentual de cinzas foi dado pela seguinte equação 3.28:

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{m_f - m_i}{m_a} \times 100 \quad (3.28)$$

Onde:

m_f = massa do cadinho final;

m_i = massa do cadinho inicial;

m_a = massa da amostra parcialmente seca (ASA);

ASA = amostra seca ao ar (g).

3.10.12 Fibra bruta

A fibra bruta foi determinada conforme metodologia 044/IV descrita pelo Instituto Adolfo Lutz (2008). Foram pesados 2 g da amostra, envolveu-se em papel de filtro e amarrou-se com lã. A extração contínua foi realizada em aparelho de Soxhlet, usando éter de petróleo como solvente. O residual de solvente foi eliminado por aquecimento em estufa. O resíduo foi transferido para um frasco Erlenmeyer de 750 mL, com boca esmerilhada. Adicionou-se 100 mL de solução ácida e 0,5 g de agente de filtração. O frasco Erlenmeyer foi adaptado a um refrigerante de refluxo por 40 minutos a partir do tempo em que a solução ácida foi adicionada, mantendo sob aquecimento. A amostra foi agitada, frequentemente, a fim de evitar que gotas sequem na parede do frasco. Em seguida, filtrou-se em cadinho de Gooch previamente preparado com areia diatomácea e com auxílio de vácuo. A amostra foi lavada com água fervente até que a água de lavagem não apresentasse indícios da reação ácida. Após isso, lavou-

se com 20 mL de álcool e 20 mL de éter e aqueceu-se a amostra em estufa a 105°C, por 2 horas. Resfriou-se em dessecador até a temperatura ambiente. A amostra foi pesada e repetidas as operações de aquecimento e resfriamento até peso constante. Incinerou-se em mufla a 550°C. Em dessecador, a amostra foi resfriada até a temperatura ambiente. A operações de aquecimento e resfriamento foram repetidas até que o peso constante fosse alcançado. A quantidade de fibra bruta é equivalente a perda de peso calculada.

$$\% \text{ Fibra bruta (m/m)} = \frac{N}{P} \times 100 \quad (3.29)$$

Onde N é a massa (g) de fibra e P é a massa (g) da amostra.

3.10.13 Carboidratos

Os carboidratos foram obtidos pela diferença dos valores encontrados para umidade, cinzas, proteínas, lipídios e fibra bruta para 100 g de amostra.

3.10.14 Determinação dos compostos fenólicos totais

Em tubos de ensaio, foram adicionados 500 µL do extrato, 1100 µL de água destilada e 100 µL do reagente Folin-Ciocalteu 50% (v/v). Os tubos foram agitados e após 10 minutos foram adicionados 50 µL de carbonato de sódio (Na₂CO₃) a 20% (p/v). Realizou-se o preparo do branco onde a amostra foi substituída por metanol. Os tubos foram incubados a 37°C em banho-maria (QUIMIS, Q334M-28, Diadema, Brasil) por 10 minutos sob proteção da luz (Athukorala *et al.*, 2006). Em seguida, as absorbâncias foram mensuradas a um comprimento de onda de 765 nm em espectrofotômetro UV/Vis (Biospectro, SP-220, Curitiba, Brasil).

O conteúdo de compostos fenólicos totais (CFT) foi calculado a partir da curva analítica do ácido gálico (Sigma-Aldrich, St. Louis, EUA) nas concentrações de 5-100 mg/L. Os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico (mg EAG/100 g de amostra).

3.10.15 Determinação do ácido ascórbico (AA)

O método para a determinação do ácido ascórbico seguiu o procedimento titulométrico modificado e descrito por Oliveira *et al.* (2010) com base na metodologia padrão da AOAC (AOAC 967.21), utilizando como indicador 2,6-di-clorofenol-indofenol (DCFI), o qual foi padronizado com 10 mL de uma solução padrão de 10 mg/100 mL de ácido L-ascórbico. Um total de 0,5 g de amostra foi adicionado a 50 mL de ácido metafosfórico e homogeneizado. Esta solução foi centrifugada por 5 minutos a 3000 rpm, e o sobrenadante resultante foi usado para titular uma solução de 2 mL de indicador DCFI e 18 mL de água destilada. O ponto final da titulação foi determinado quando a solução padrão (com tonalidade azul) e o titulante alcançaram a mesma cor (Figura 3.6 - C). Os resultados foram expressos em mg por 100 g de amostra (mg/100 g). Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Para o cálculo da quantidade de AA presente na amostra, foi aplicada a Equação 3.30:

$$C = \frac{p \cdot c \cdot 50}{V \cdot m} \cdot 100 \quad (3.30)$$

Em que “C” é a massa de AA (mg) presente em 100 g de amostra, “p” é o volume (mL) gasto de solução padrão de AA, cuja concentração é “c” (mg.mL⁻¹) na padronização do DCFI. “V” é o volume (mL) de extrato de amostra utilizado durante a titulação e “m” é a quantidade de amostra utilizada na extração.



Figura 3.6 - Análise do teor de ácido ascórbico. (A) Amostras após a centrifugação; (B) Etapas da titulação – erlenmeyer com coloração azul: antes de iniciar a titulação, erlenmeyer com coloração rosa: durante a titulação; (C) Ponto final da titulação. Fonte: Arquivo pessoal.

3.10.16 Carotenoides

Para determinação do teor de carotenoides nas amostras foi utilizada a metodologia proposta por Lichtenthaler & Buschmann (2001). Foram pesados 1 g de polpa e 0,3 g de cada pó produzido. As amostras foram acondicionadas em tubos de ensaio envoltos em papel alumínio para proteger da luz e, em cada um dos tubos, foram adicionados 18 mL de acetona. As amostras foram homogeneizadas e filtradas utilizando-se papel de filtro qualitativo. Em seguida, foi feita a leitura em espectrofotômetro (modelo Genesys 10s Vis Spectrophotometer, EUA) nos comprimentos de onda 470 nm, 645 nm e 662 nm contra branco constituindo de acetona. As leituras foram realizadas em ambiente escuro e o teor de carotenoides ($\mu\text{g/mL}$) calculado a partir das equações a seguir.

$$\text{Ca} = 11,24.A_{662} - 2,04.A_{645} \quad (3.31)$$

$$\text{Cb} = 20,13.A_{645} - 4,19.A_{662} \quad (3.32)$$

$$C_{(x+c)} = (1000.A_{470} - 1,90.Ca - 63,14.Cb)/214 \quad (3.33)$$

3.10.17 Preparação dos extratos

Os extratos foram preparados por extração acetônica realizada de acordo com a metodologia proposta por Shaari *et al.* (2018). Inicialmente, 250 mg de cada amostra foram misturados a 10 mL de acetona 60% por 20 minutos a 30 °C. Em seguida, a mistura foi centrifugada (Centribio, 80-2B, São Paulo, Brasil) a 2500 rpm por 10 minutos em temperatura ambiente, e o sobrenadante usado para determinação dos fenólicos totais e atividades antioxidantes. O solvente utilizado na extração (acetona 60%) foi aplicado como branco das análises.

3.10.18 Sequestro do radical DPPH

A capacidade de sequestro de radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) foi avaliada conforme Nóbrega *et al.* (2015) utilizando microplacas com 96 poços. Em resumo, 40 μL de cada extrato foram adicionados a 200 μL de uma solução de DPPH 0,1 mM em etanol. A

mistura foi incubada por 25 minutos em câmara escura e a leitura realizada a 517 nm em leitor de microplacas Epoch-Biotek (Winooski, VT, USA). Os resultados foram expressos em percentual de sequestro do radical DPPH (%).

$$\text{Sequestro de radicais DPPH (\%)} = \frac{\text{Absorbância controle} - \text{Absorbância amostra}}{\text{Absorbância controle}} \times 100 \quad (3.34)$$

3.10.19 Sequestro do radical ABTS

O ensaio do potencial antioxidante pelo método de radical ABTS [2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfônico)] foi realizado conforme a metodologia proposta por Rufino *et al.* (2007) com adaptações para ser utilizado em microplaca de 96 poços.

O ensaio foi realizado em penumbra, adicionando-se 40 µL de extrato e 260 µL da solução diluída do radical ABTS em cada poço da microplaca. Um controle foi realizado substituindo-se as amostras por etanol (Chávez *et al.*, 2017). A amostra foi incubada ao abrigo da luz por 6 minutos e a análise realizada em leitor de microplaca (Biochrom Asys, UVM340, Cambridge, Reino Unido) a 734 nm.

A curva padrão foi construída com concentrações de trolox (ácido 2-carboxílico-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano) variando de 30 a 200 µM e os resultados expressos em µmol de trolox equivalente por grama de amostra (µmol TE/g).

3.10.20 Atividade antioxidante total

A atividade antioxidante total (AAT) foi determinada pelo método do fosfomolibdênio com modificações (Kumaran & Karunakaran, 2005). Para isso, 100 µL de cada extrato foram adicionados em tubos de ensaio contendo 100 µL de molibdato de amônio 40 mM, 100 µL de fosfato de sódio 280 mM e 700 µL de água destilada. Em seguida, as amostras foram incubadas a 100 °C por 90 minutos e, após resfriadas, a absorbância foi lida em espectrofotômetro a 695 nm. Para expressar o resultado em mg de ácido ascórbico equivalente por grama de amostra (mg AA/g), foi elaborada uma curva padrão com concentrações de ácido ascórbico na faixa de 25 a 250 mg/mL.

3.10.21 Atividade quelante

A capacidade das amostras quelarem o íon ferro foi determinada conforme Galinari *et al.* (2018). A mistura reacional contendo 910 µL do extrato, 30 µL de FeCl₂ 2 mM e 60 µL de ferrozina 5 mM foi agitada e incubada a 37 °C por 10 minutos. A absorbância foi medida a 562 nm em espectrofotômetro. Os resultados foram expressos em percentual de atividade quelante (%).

$$\text{Atividade quelante (\%)} = \frac{\text{Absorbância controle} - \text{Absorbância amostra}}{\text{Absorbância controle}} \times 100 \quad (3.35)$$

3.10.22 Análise estatística dos resultados das análises

Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão. Para os ensaios, o estudo estatístico foi realizado por análise de variância (ANOVA) seguido pelo teste Tukey, considerando o grau de confiança de 95% ($p < 0,05$) como resultado significativo, utilizando o software Statistica 7.0.

Capítulo 4

Resultados e discussão

4 Resultados e discussão

Este capítulo foi subdividido em três seções e aborda os resultados e discussões para as etapas de otimização dos parâmetros de processo, análises estatísticas, ajustes de modelos matemáticos e avaliação dos impactos gerados pela secagem no pó de ameixa produzido pelo método foam mat.

4.1 Efeito do tempo de batimento e concentração de albumina de ovo nas propriedades físicas, térmicas e de secagem da espuma de ameixa

Inicialmente, foram investigados os efeitos das variáveis de processo, tempo de batimento e concentração de albumina de ovo, sobre as propriedades físicas e térmicas da espuma de ameixa, além do tempo de secagem com o intuito de avaliar a melhor condição operacional para a produção da espuma de ameixa. Os experimentos foram conduzidos de acordo com o planejamento fatorial completo 3^2 , com três réplicas no ponto central, composto de duas variáveis independentes: concentração de albumina (3, 5 e 7% p/p) e tempo de batimento (6, 10 e 14 min). A secagem foi realizada a 70 °C e a espessura da camada foi 0,8 cm.

4.1.1 Influência da concentração de albumina de ovo e do tempo de batimento nas propriedades físicas e térmicas da espuma de ameixa

4.1.1.1 Densidade, expansão e porosidade da espuma

Os efeitos do tempo de batimento e da concentração de albumina sobre a densidade, expansão e a porosidade da espuma de ameixa são mostrados na Figura 4.1. A densidade variou no intervalo de 0,110 a 0,160 g/cm³, a expansão de 506,06 a 804,45% e a porosidade de 0,835 a 0,889 no intervalo de tempo de batimento de 6, 10 e 14 minutos e para as três concentrações de albumina analisadas (3, 5 e 7%). Analisando os gráficos da Figura 4.1 (A1-A2, B1-B2 e C1-C2), é possível observar que as respostas da densidade apresentam comportamento diretamente inverso ao da expansão e da porosidade, sendo os perfis de resposta dessas duas últimas bastante análogos, apesar de serem propriedades diferentes.

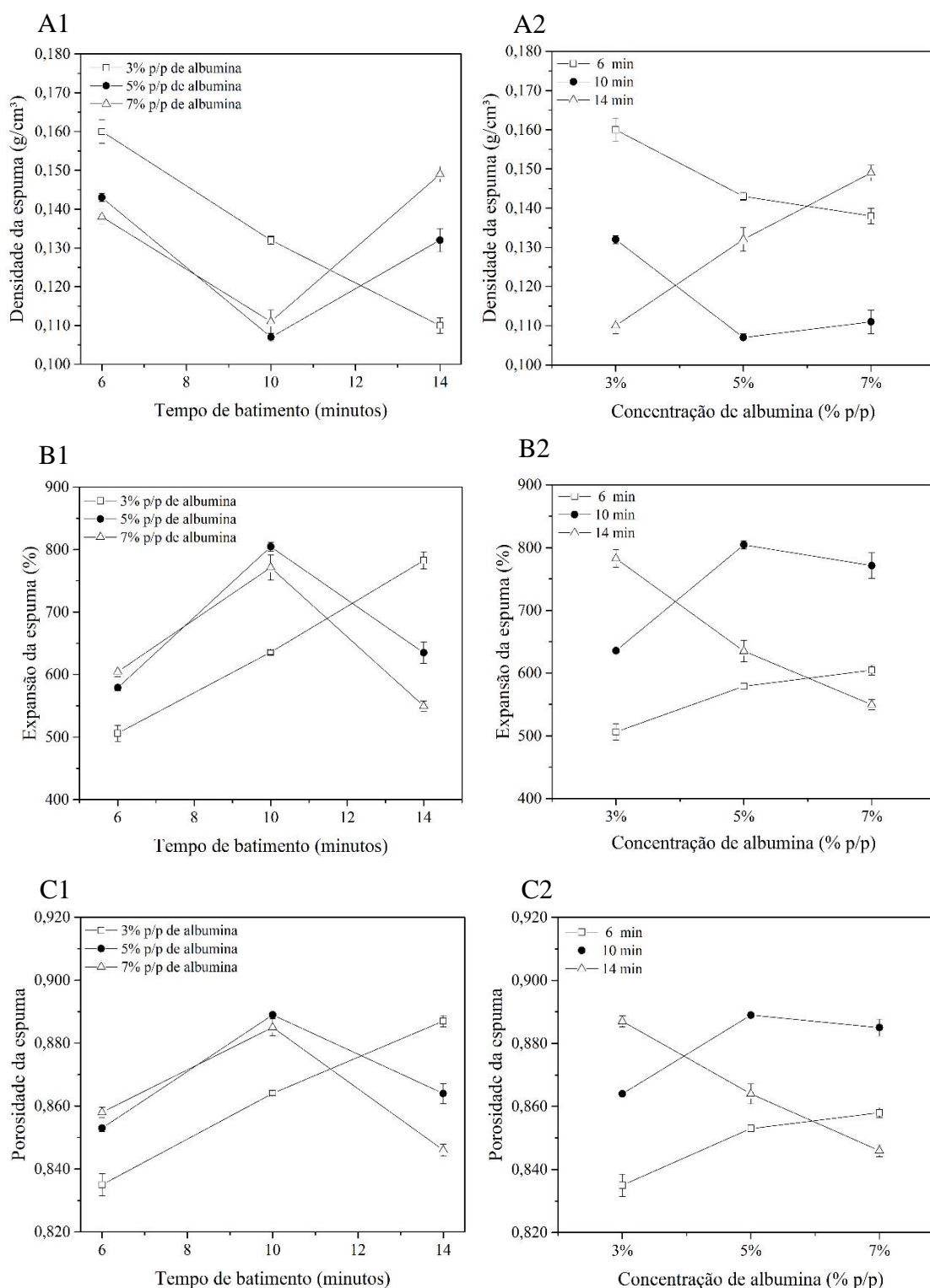


Figura 4.1 - (A1) Densidade da espuma *versus* tempo de batimento; (A2) Densidade da espuma *versus* concentração de albumina; (B1) Expansão da espuma *versus* tempo de batimento; (B2) Expansão da espuma *versus* concentração de albumina; (C1) Porosidade da espuma *versus* tempo de batimento; (C2) Porosidade da espuma *versus* concentração de albumina.

A razão disso pode ser atribuída ao fato de que ambas as propriedades, expansão e porosidade, são inferidas a partir da densidade da espuma e estão correlacionadas inversamente com essa. Portanto, as explicações feitas aqui para os efeitos observados com uma variável, poderá ser compreendido e adaptado para as outras duas variáveis, resguardadas as condições de correlação entre elas.

As curvas exibidas na Figura 4.1 fornecem dados importantes sobre o comportamento da espuma de ameixa em função do tempo de batimento e da concentração de aditivo. O ar incorporado através do processo de batimento é aprisionado no líquido em forma de bolhas (Thuwapanichayanan *et al.* 2008). Isso faz com que ocorra uma diminuição da densidade da espuma à medida que o tempo de batimento aumenta e, conseqüentemente, um aumento no seu percentual de expansão e também na porosidade.

O estudo realizado para a espuma de ameixa mostrou que o aumento no tempo de batimento resulta em uma maior expansão e porosidade, para o caso de menor valor de concentração da albumina (3%), como pode ser visto na Figura 4.1 B1-C1. Para as maiores concentrações de albumina, ambas propriedades aumentaram com o tempo de batimento até atingirem um ponto máximo e, em seguida, entrarem em uma região de decréscimo. No caso particular da concentração de 3%, não foi evidenciado o decaimento para os tempos de batimento estudados, uma vez que para uma concentração mais baixa de agente espumante, a região de decréscimo da expansão provavelmente poderá ser atingida em tempos de batimento mais elevados. Destaca-se aqui que para a densidade ocorre um comportamento exatamente inverso ao que foi descrito anteriormente e resultados análogos também foram evidenciado por Shaari *et al.* (2018) para a espuma de abacaxi.

No que se refere ao tempo de batimento (Figura 4.1 B2-C2), nota-se que a expansão e a porosidade cresceram com o aumento da concentração de albumina para o menor tempo de batimento (6 min). Para o tempo de batimento igual a 10 min, essas propriedades cresceram com o aumento da concentração (de 3% para 5%), mas tenderam a diminuir no maior nível de concentração. Particularmente, um comportamento inverso é verificado no maior tempo de batimento (14 min), ou seja, ocorre redução da expansão e porosidade com o aumento da concentração de agente espumante. Tal fato pode ser explicado analisando que quanto maior o tempo de batimento, mais alta é a taxa de cisalhamento promovida na formação da espuma. Uma maior concentração de albumina em condições de altas taxas de cisalhamento, pode acentuar os efeitos de desnaturação, agregação e precipitação das proteínas do agente

espumante, levando a uma diminuição no poder de formação da espuma (Damodaran *et al.*, 2010). De uma forma inversa ao que foi descrito acima, tem-se o perfil de resposta da densidade.

É importante destacar que os valores obtidos no presente estudo para a expansão da espuma de ameixa foram bastante elevados e muito superiores aos resultados relatados por outros autores estudando diferentes espumas, tais como: banana (Thuwapanichayanan *et al.*, 2012), bael (Bag *et al.*, 2011), mamão (Kandasamy *et al.*, 2014), yacon (Franco *et al.*, 2015), camarão (Azizpour *et al.*, 2014), melão (Sangamithra *et al.*, 2015) e beterrada (Ng & Sulaiman, 2018).

4.1.1.2 Volume drenado

O corte das lamelas resulta em drenagem da espuma, que por sua vez leva à separação da fase líquida da camada de interface e, portanto, a maior possibilidade de colapso do filme (Muthukumaran *et al.*, 2008). A desestruturação da espuma com o passar do tempo também ocorre devido à gravidade e ao aumento do tamanho da bolha de espuma como resultado da fusão de pequenas bolhas juntas (Devries, 1958; Azizpour *et al.*, 2014).

Para todas as espumas preparadas nas condições de tempo de batimento e concentração delineadas no planejamento experimental, foi aplicado o método do volume drenado para teste da estabilidade da espuma, tendo sido verificado que apenas as espumas no tempo de batimento de 6 minutos, para as concentrações de 3 e 5% de agente espumante, drenaram. O valor drenado foi considerado inexpressivo, visto que não ultrapassou 0,5 e 0,1 mL, respectivamente. Para as demais concentrações e tempos de batimento não foi evidenciado qualquer volume drenado mostrando que a espuma de ameixa nas condições executadas neste estudo é bastante estável e, por isso, aplicável ao processo de secagem em camada de espuma.

4.1.1.3 Propriedades térmicas da espuma

A análise dos parâmetros térmicos foi também realizada para que se pudesse verificar a influência da incorporação de ar em diferentes propriedades da espuma, com o intuito de verificar se um elevado percentual de expansão da espuma de ameixa, conforme foi evidenciado neste estudo, seria favorável ou não ao processo de secagem. Na Tabela 4.1, são exibidas as

medidas da condutividade térmica e capacidade térmica das espumas, mostrando a variação da concentração e do tempo de batimento sobre as variáveis dependentes.

Tabela 4.1 - Condutividade e capacidade térmica das espumas

Tempo de batimento (min)	Concentração de albumina (% p/p)	Condutividade térmica da espuma (W/m·K)	Capacidade térmica da espuma (MJ/m ³ ·K)
6	3	0,137 ± 0,012	0,530 ± 0,006
10	3	0,122 ± 0,014	0,463 ± 0,007
14	3	0,115 ± 0,010	0,433 ± 0,022
6	5	0,137 ± 0,011	0,572 ± 0,029
10	5	0,119 ± 0,001	0,444 ± 0,005
14	5	0,129 ± 0,002	0,515 ± 0,007
6	7	0,128 ± 0,003	0,541 ± 0,004
10	7	0,120 ± 0,003	0,455 ± 0,012
14	7	0,138 ± 0,006	0,453 ± 0,008
10	5	0,118 ± 0,003	0,437 ± 0,009
10	5	0,116 ± 0,004	0,434 ± 0,002
10	5	0,115 ± 0,003	0,425 ± 0,004

Fazendo-se uma análise de correlação da condutividade térmica com a densidade da espuma e a porosidade (Figura 4.2), nota-se que a condutividade térmica está fortemente correlacionada com a densidade e, por sua vez, com a porosidade ou frações de vazios no meio (Bergman *et al.*, 2011), sendo fortemente dependente da quantidade de espaços vazios, do tamanho dos poros e do fluido contido neles (Bird *et al.*, 2002). Com isso, evidencia-se na Figura 4.2 que a diminuição da densidade da espuma e consequente elevação da porosidade provocou a diminuição da condutividade térmica, devido ao ar incorporado apresentar baixa condutividade ($k = 0,0287$ W/m·K) (Kumar *et al.*, 2014). Resultado semelhante também foi encontrado por Dehghannya *et al.* (2019) para secagem de suco de lima, observando a mesma relação entre a

densidade, porosidade e condutividade térmica reportada no presente trabalho para todas as condições de tempo de batimento na concentração de 3% (p/p).

Assim, por estar correlacionado diretamente com a densidade (r de Pearson = 0,813) e inversamente com a porosidade (r de Pearson = - 0,816), a condutividade térmica apresenta um comportamento similar de resposta ao que já foi discutido previamente com as variáveis densidade, expansão e porosidade em relação ao tempo de batimento e concentração de albumina, como pode ser visto na Figura 4.3.

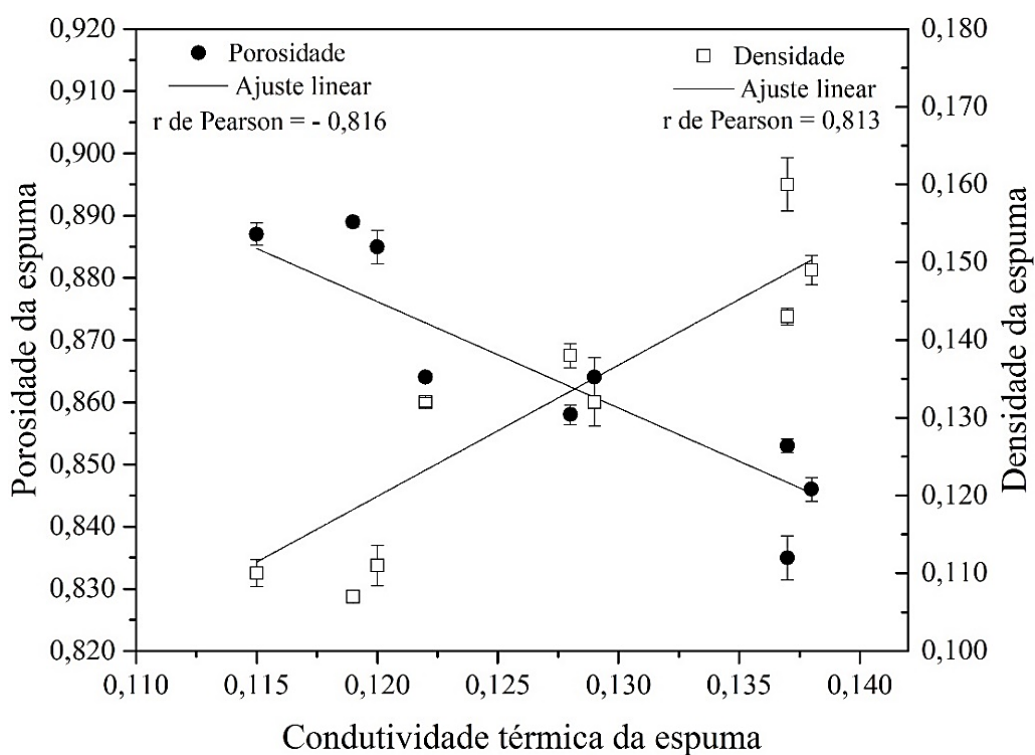


Figura 4.2 - Correlação da condutividade térmica com a densidade e a porosidade da espuma

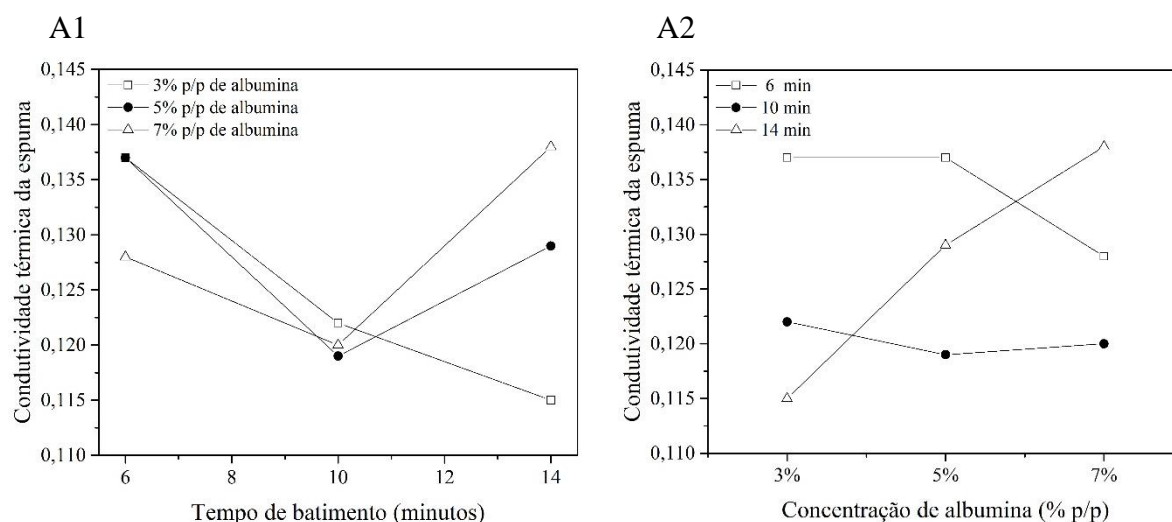


Figura 4.3 – Avaliação da condutividade térmica da espuma com o tempo de batimento e a concentração de albumina

No que se refere à análise da capacidade térmica da espuma com o tempo de batimento e com a concentração de albumina, nota-se na Figura 4.4 que para as concentrações de 3% e 5% de albumina, o C_p apresenta um perfil de comportamento em relação ao tempo de batimento (Figura 4.4 A1) análogo ao da condutividade térmica. No entanto, na maior concentração de albumina (7%) e no maior tempo de batimento, observou-se um valor de C_p inferior ao que se esperava como tendência. O mesmo pode ser evidenciado nos perfis de C_p (Figura 4.4 A2) em relação à concentração de albumina, onde se observa que para os menores tempos de batimento (6 e 10 min) e em todas as concentrações, o comportamento da capacidade térmica segue uma correspondência com a condutividade térmica. Porém, no maior tempo de batimento e na maior concentração essa correspondência não fica evidente. Como já mencionado, quanto maior o tempo de batimento, mais alta é a taxa de cisalhamento promovida na formação da espuma. Por outro lado, uma combinação de alta concentração de albumina e altas taxas de cisalhamento pode levar a desnaturação, agregação e precipitação das proteínas do agente espumante, alterando o comportamento da condutividade e capacidade térmica da espuma.

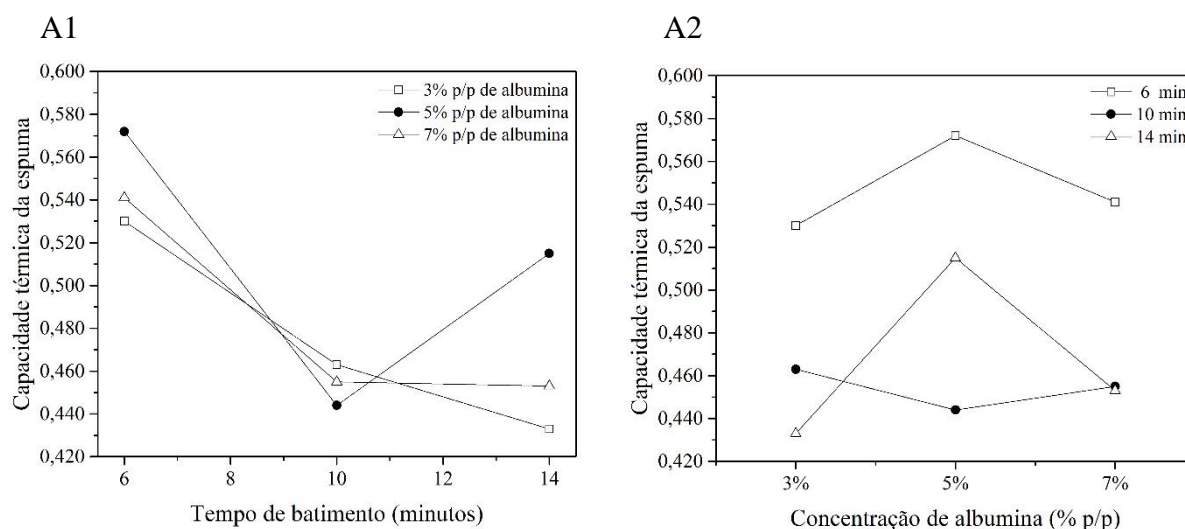


Figura 4.4 - Avaliação da capacidade térmica da espuma com o tempo de batimento e a concentração de albumina

4.1.2 Secagem das espumas e difusividade efetiva

As curvas de secagem para diferentes concentrações de albumina e tempos de batimento podem ser vistas na Figura 4.5. Observa-se que na concentração de 3%, o aumento no tempo de batimento provocou uma diminuição do tempo de secagem de 75 para 50 min (Figura 4.5 A). Tendência semelhante também foi evidenciada no estudo realizado por Thuwapanichayanan *et al.* (2008) para secagem de espuma de banana.

Para a concentração de 5%, as curvas de secagem para os tempos de batimento de 10 e 14 minutos se sobrepõem (Figura 4.5 B), enquanto para a concentração de 7% (Figura 4.5 C) a sobreposição das curvas de secagem se verifica para os tempos de batimento de 6 e 14 minutos, demonstrando que para níveis de concentração de agente espumante mais altos, operar com tempos de batimento elevados é desfavorável ao processo de secagem, como também foi evidenciado por Kadam & Balasubramanian (2011) em seu estudo sobre secagem de suco de tomate em camada de espuma, cuja secagem foi favorecida pelo aumento do agente espumante até certo ponto, evidenciando uma tendência de decréscimo para concentrações mais elevadas de albumina.

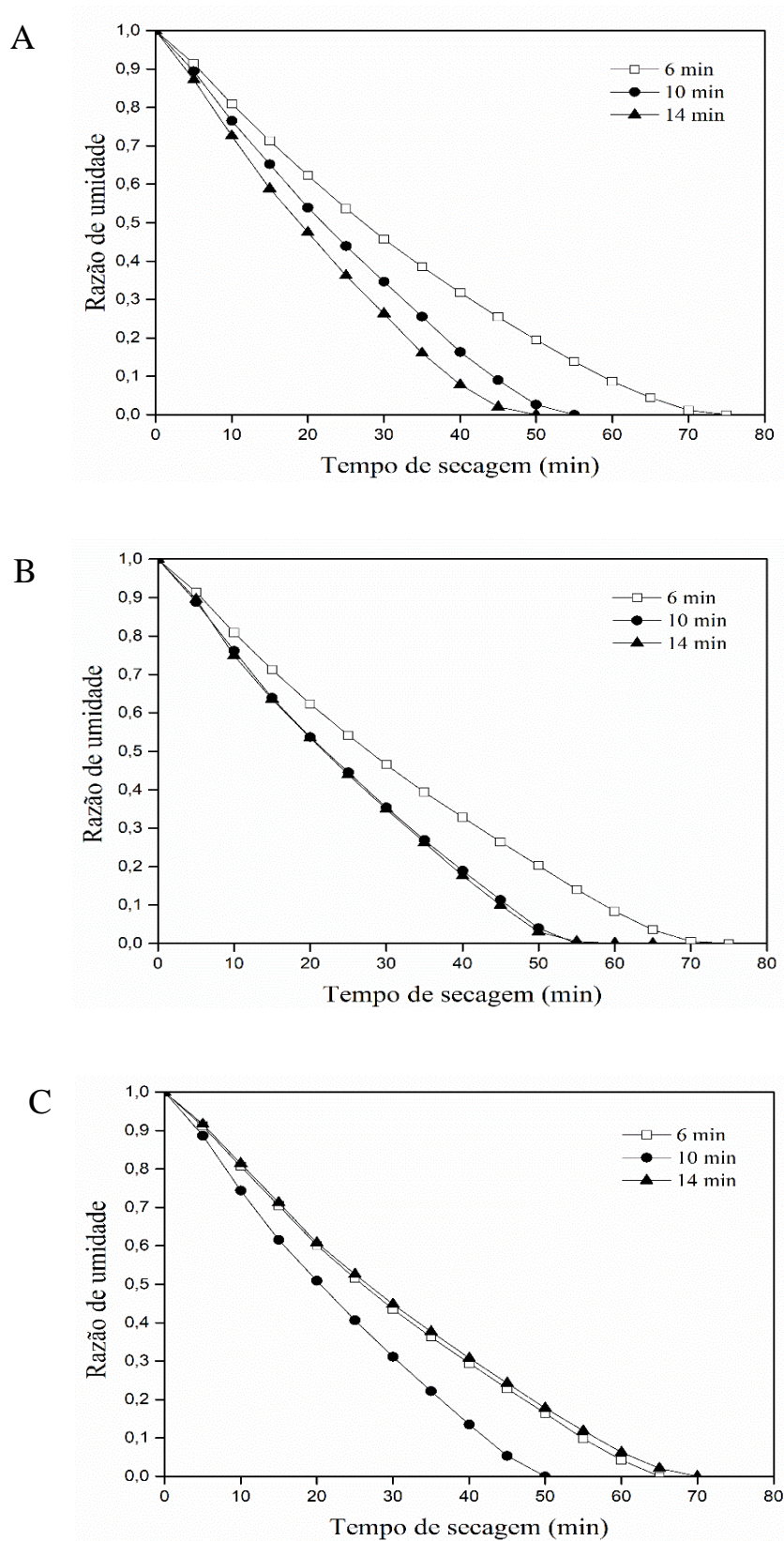


Figura 4.5 - Curvas de secagem – razão de umidade versus tempo de secagem para diferentes concentrações de albumina. (A) 3%; (B) 5%; (C) 7%

No estudo realizado por Rajkumar *et al.* (2007) com manga espumada e não espumada foi observado que a polpa de manga espumada apresentou maior difusão de umidade quando comparada à polpa de manga não espumada, devido ao maior espaço de poros com maior área superficial, o que favoreceu a difusão da umidade durante a secagem. Kandasamy *et al.* (2014) evidenciou que a taxa de remoção de umidade na polpa de mamão espumada foi muito alta em comparação com a polpa não espumada, atribuindo ao fato de que a água presente na polpa da espuma estava na forma de filmes finos que facilmente vaporizavam. Resultados similares também são reportados por Akintoye & Oguntunde (1991) para leite de soja, Ablone *et al.* (2000) para batata, Mishra *et al.* (2002) para maçã, Gaston *et al.* (2004) para trigo, Thuwapanichayanan *et al.* (2008) para banana.

Fazendo-se uma análise de correspondência entre o tempo de secagem com as propriedades físicas e térmicas da espuma, é possível observar na Figura 4.6 que o tempo de secagem está fortemente correlacionado com a densidade da espuma (r de Pearson = 0,906) e com a condutividade térmica da espuma (r de Pearson = 0,956). Isso explica o fato de que a diminuição da densidade da espuma e, conseqüentemente, o aumento da porosidade mostraram que a incorporação de ar elevada provocou a diminuição da condutividade térmica, mas não prejudicou o tempo de secagem, demonstrando que os efeitos condutivos de troca térmica são menos importantes que os efeitos convectivos de calor. Por outro lado, a incorporação de ar durante o batimento e a conseqüente redução da densidade da espuma favorecem a transferência de massa no processo de secagem devido ao aumento da área superficial do material e a redução das resistências internas à difusão de umidade.

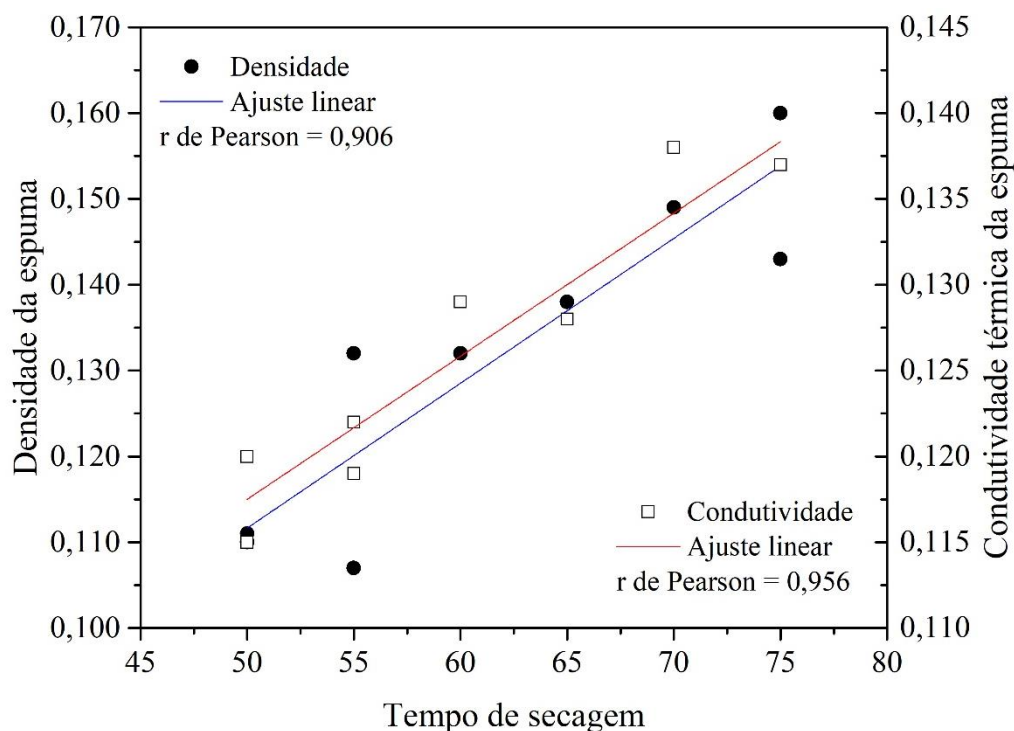


Figura 4.6 - Correlação do tempo de secagem com a condutividade térmica e a densidade da espuma

Na tabela 4.2 são exibidos os valores da difusividade efetiva estimados a partir do ajuste do modelo de Fick (Equação 3.6) aos dados experimentais da razão de umidade em função do tempo, bem como os respectivos coeficientes de determinação (R^2). Conforme se observa, os coeficientes de determinação foram da ordem de 94% em média, valores satisfatórios e semelhantes aos encontrados por Sangamithra *et al.* (2015) para a secagem de melão. As difusividades efetivas ficaram compreendidas entre $1,036 \cdot 10^{-8}$ e $1,558 \cdot 10^{-8}$ m^2/s , valores bastante satisfatórios quando comparados aos relatados para alimentos que compreendem uma faixa de 10^{-12} a 10^{-8} m^2/s (Mcminn & Magee, 1999; Franco *et al.*, 2017). O valor mais elevado para o coeficiente de difusão efetiva foi encontrado para a concentração de 3% e tempo de batimento de 14 minutos.

Tabela 4.2 - Tempo de secagem e difusividade efetiva

Tempo de batimento (min)	Concentração de albumina (% p/p)	Tempo de secagem (min)	Difusividade efetiva (m ² /s)	R ²
6	3	75	1,046·10 ⁻⁸	0,944
10	3	55	1,319·10 ⁻⁸	0,937
14	3	50	1,558·10 ⁻⁸	0,943
6	5	75	1,036·10 ⁻⁸	0,943
10	5	55	1,487·10 ⁻⁸	0,940
14	5	60	1,416·10 ⁻⁸	0,940
6	7	65	1,048·10 ⁻⁸	0,940
10	7	50	1,387·10 ⁻⁸	0,940
14	7	70	1,057·10 ⁻⁸	0,941
10	5	50	1,443·10 ⁻⁸	0,942
10	5	55	1,347·10 ⁻⁸	0,944
10	5	55	1,288·10 ⁻⁸	0,939

Uma análise de correlação da difusividade efetiva com as propriedades físicas e térmicas da espuma, bem como com o tempo de secagem, foi realizada (Figura 4.7). Nessa análise de dados, a difusividade efetiva apresentou correlações inversas e significativas com a densidade da espuma (r de Pearson = -0,880), com a condutividade térmica (r de Pearson = -0,877) e com o tempo de secagem (r de Pearson = -0,897). Portanto, esses resultados corroboram com a discussão anterior de que quanto menor a densidade da espuma, menor será a condutividade térmica e, ainda assim, menor será o tempo de secagem, tendo em vista que a difusividade efetiva será maior e, desta forma, favorecerá os efeitos de transferência de massa durante a secagem da espuma. Como já apresentado previamente, vale aqui ressaltar que a densidade é inversamente correlacionada com a expansão da espuma e, portanto, a difusividade efetiva segue um comportamento de resposta similar ao da expansão da espuma, quando avaliada em relação ao tempo de batimento e a concentração de albumina.

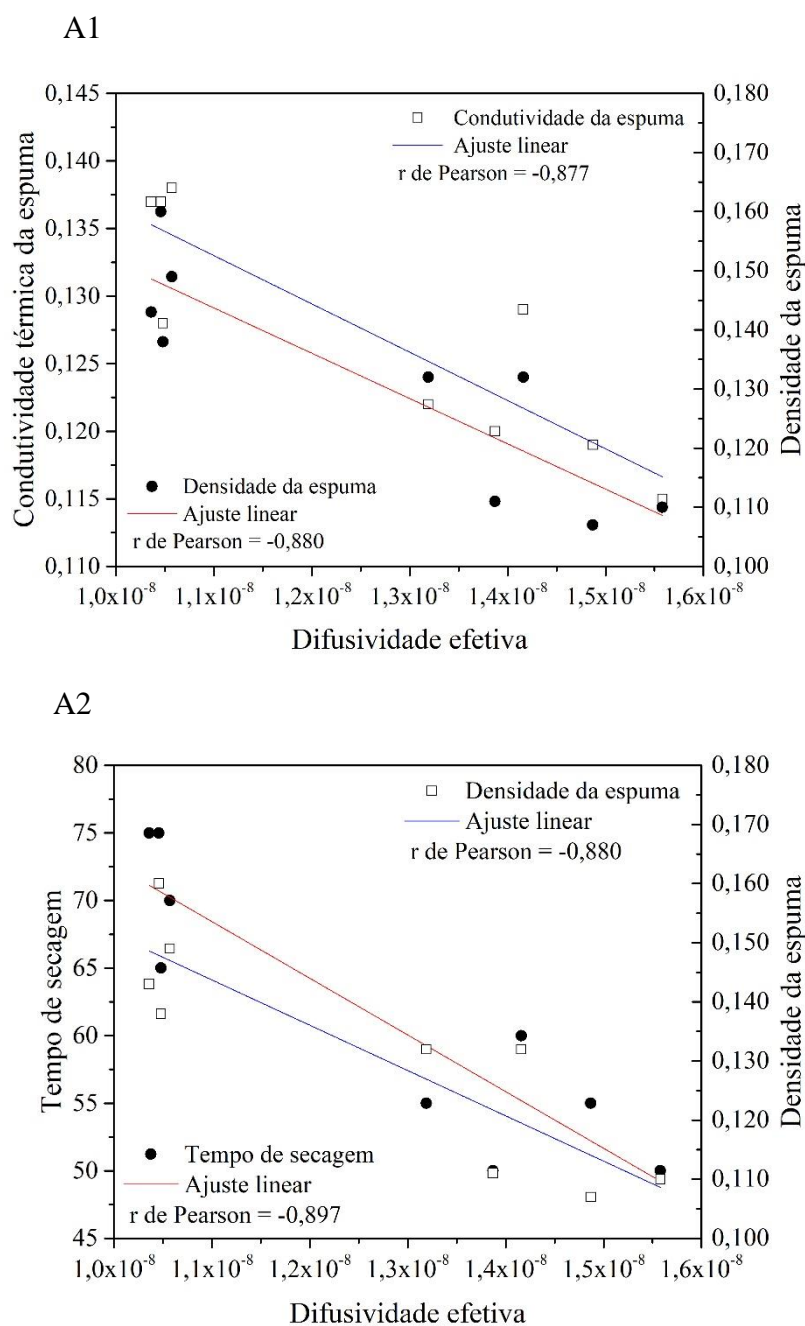


Figura 4.7 - Correlação da difusividade efetiva com a condutividade térmica da espuma (A1), densidade da espuma e tempo de secagem (A2)

4.1.3 Análise estatística

Para ratificar as observações anteriores, gráficos de Pareto foram construídos para todas as respostas analisadas no planejamento experimental (Figura 4.8). Esses gráficos ilustram o efeito estatístico ($p < 0,05$) das variáveis independentes (tempo de batimento e concentração de

albumina) sobre as respostas analisadas. Na Figura 4.8, observa-se que as variáveis dependentes do processo são influenciadas pelo tempo de batimento, seja linear ou quadrático, com efeitos negativos, ou seja, as variáveis dependentes tendem a diminuir com o aumento do tempo de batimento, expresso como um modo de incorporação de ar. Vale ressaltar, conforme exposto anteriormente, que esse comportamento só é evidenciado na região de aumento da expansão, apresentando um efeito inverso quando a expansão descrece (Figura 4.1 B1), o que justifica a maior intensidade do efeito do tempo de batimento quadrático sobre a densidade, propriedades térmicas e tempo de secagem.

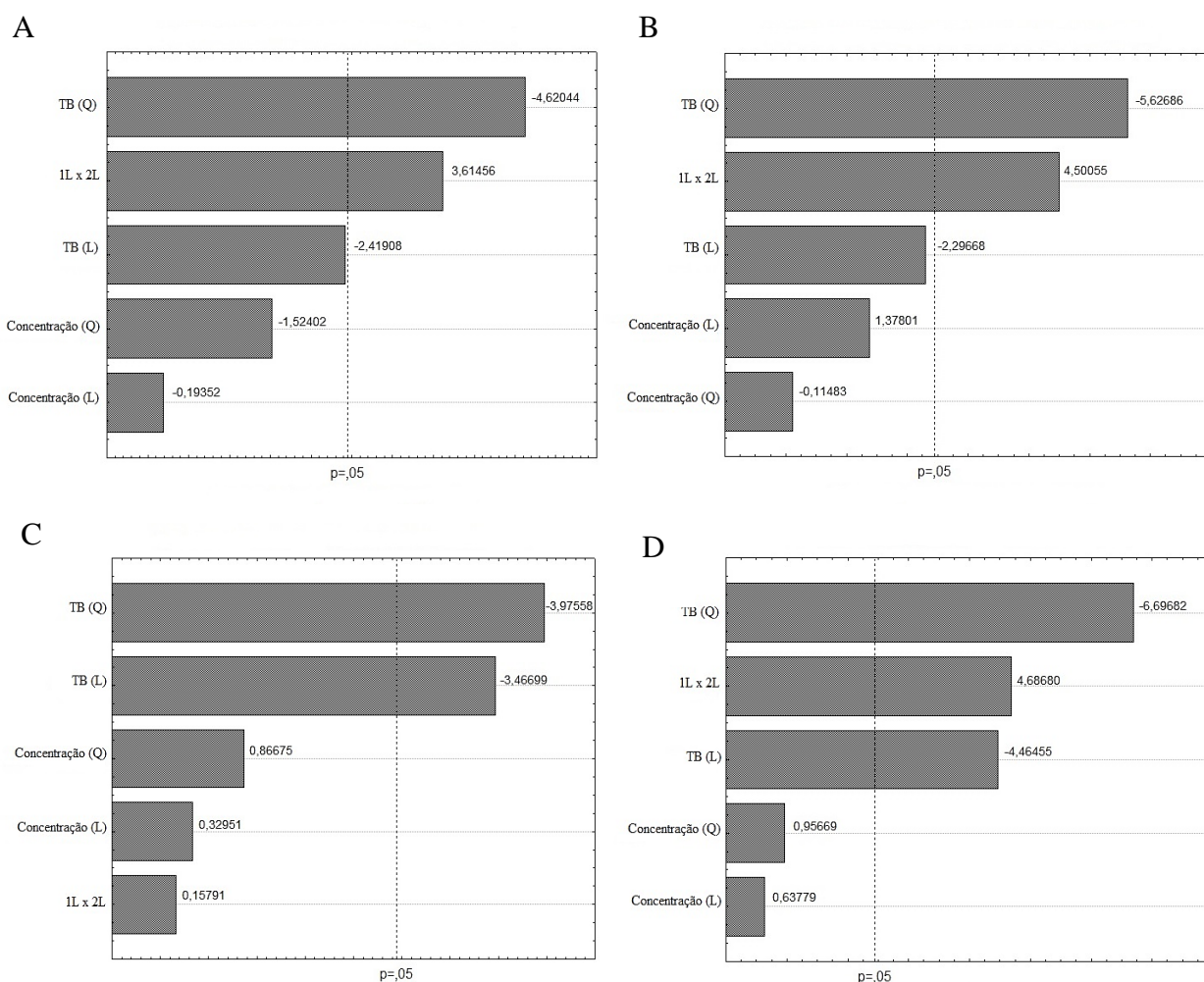


Figura 4.8 - Gráficos de Pareto dos efeitos das variáveis de processo nas espumas de ameixa no intervalo de confiança de 95%: (A) Densidade aparente da espuma (g/cm^3); (B) Condutividade térmica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); (C) Capacidade térmica ($\text{MJ}/\text{m}^3\cdot\text{K}$); (D) Tempo de secagem (min)

Além disso, ainda é observado que o efeito da concentração não é significativo para nenhuma das variáveis analisadas, mas a interação linear entre a concentração de albumina e o tempo de batimento foi significativa e de efeito positivo para todas as respostas, exceto para a capacidade térmica. O efeito positivo desta interação é estatisticamente mais significativo do que o efeito negativo e linear do tempo de batimento e representa o comportamento bimodal destas variáveis frente ao tempo de batimento nas regiões de menor e maior concentração.

A análise de regressão para todas as variáveis dependentes é mostrada na Tabela 4.3. O cálculo do teste F foi efetuado a fim de verificar se os modelos obtidos foram significativos e preditivos. O resultado mostrou que os modelos estatísticos obtidos foram significativos para todas as respostas (Teste F – Regressão: $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} > 1$), sendo preditivos apenas para a condutividade térmica e tempo de secagem conforme mostra a Tabela 4.3 (Teste F – Falta de ajuste: $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} < 1$).

Tabela 4.3 - Análise de regressão das variáveis dependentes

Variável dependente	R ²	Teste F (Regressão)			Test F (Falta de ajuste)		
		F _{calc} QM _R /QM _r	F _{tab} (95%)	F _{calc} / F _{tab}	F _{calc} QM _{falta} /QM _{erro}	F _{tab} (95%)	F _{calc} / F _{tab}
ρ (g/cm ³)	0,894	8,53	4,39	1,94	31,86	9,28	3,43
k (W/m.K)	0,914	11,82	4,39	2,69	6,58	9,28	0,71
C _p (MJ/m ³ .K)	0,824	5,74	4,39	1,31	25,19	9,28	2,72
Tempo de secagem (min)	0,937	17,61	4,39	4,01	2,28	9,28	0,25

Os modelos empíricos finais não codificados mostram os efeitos das variáveis independentes na condutividade térmica e tempo de secagem. Os termos não significativos ($p < 0,05$) não foram negligenciados, visto que a omissão prejudicava o resultado. As equações são apresentadas a seguir:

$$CT = 0,250 - 0,963.X + 0,625.X^2 - 0,0212.TB + 0,000766.TB^2 + 0,0999.X.TB \quad (4.1)$$

$$TS = 183,646 - 427,083.X - 4687,500.X^2 - 22,552.TB + 0,8203.TB^2 + 93,750.X.TB \quad (4.2)$$

Onde CT é a condutividade térmica (W/m.K), X é a concentração de albumina (% p/p), TB é o tempo de batimento (min) e TS é o tempo de secagem (min).

A Figura 4.9 mostra a relação entre os valores preditos pelas Equações 4.1 e 4.2 e os valores experimentais mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Evidencia-se que houve boa concordância entre os dados preditos e observados.

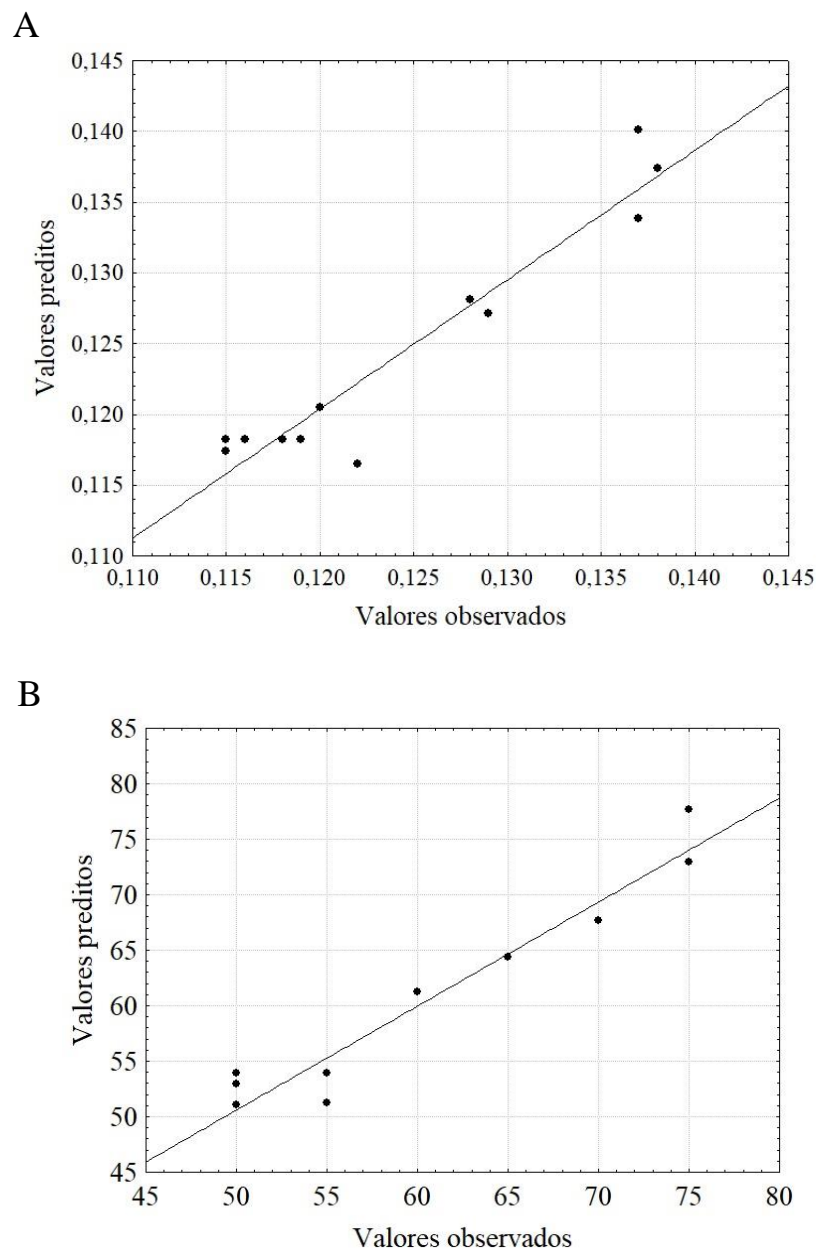


Figura 4.9 - Valores preditos *versus* valores observados. (A) Condutividade térmica (W/m.K); (B) Tempo de secagem (minutos)

4.1.4 Função de conveniência ou método *desirability*

A função de conveniência também conhecida por método *desirability* tem como objetivo encontrar as condições mais favoráveis para o processo a fim de garantir a conformidade com os critérios estabelecidos para as variáveis dependentes selecionadas e com isso obter o valor mais desejável para as variáveis independentes a partir da análise múltipla das variáveis resposta selecionadas. A aplicação deste método permite conversão de múltiplas variáveis respostas em uma única, combinando as respostas individuais em uma função composta, seguida por sua otimização (Candiotti *et al.*, 2014).

Com o estudo realizado nesta seção, evidenciou-se que apesar da condutividade térmica diminuir com o aumento do tempo de batimento, houve a diminuição do tempo de secagem demonstrando que a elevada incorporação de ar na espuma não prejudicou o processo, sendo ele favorecido pelo aumento da área superficial do material e, devido a isso, dentre as propriedades analisadas, selecionou-se a densidade da espuma e o tempo de secagem como variáveis resposta para a análise múltipla e obtenção das variáveis independentes (tempo de batimento e concentração de albumina) otimizadas. Os critérios utilizados foram: 1 para os menores valores de densidade e tempo de secagem (a redução é desejada) e 0 para os valores mais altos destas variáveis (valores indesejados). Na Figura 4.10, são apresentados os gráficos do método *desirability*, onde é apresentado o resultado do cenário ótimo, cujos os valores foram de 3% para a concentração de albumina e 12 minutos de tempo de batimento, condições essas que levaram a uma função conveniência de 93,17%, bastante satisfatória uma vez que 100% é o valor máximo desejado.

Vale ressaltar que as condições otimizadas nesta seção, 3% p/p de albumina de ovo e 12 minutos de tempo de batimento, foram aplicadas nas seções 4.2 e 4.3 para a preparação da espuma de ameixa.

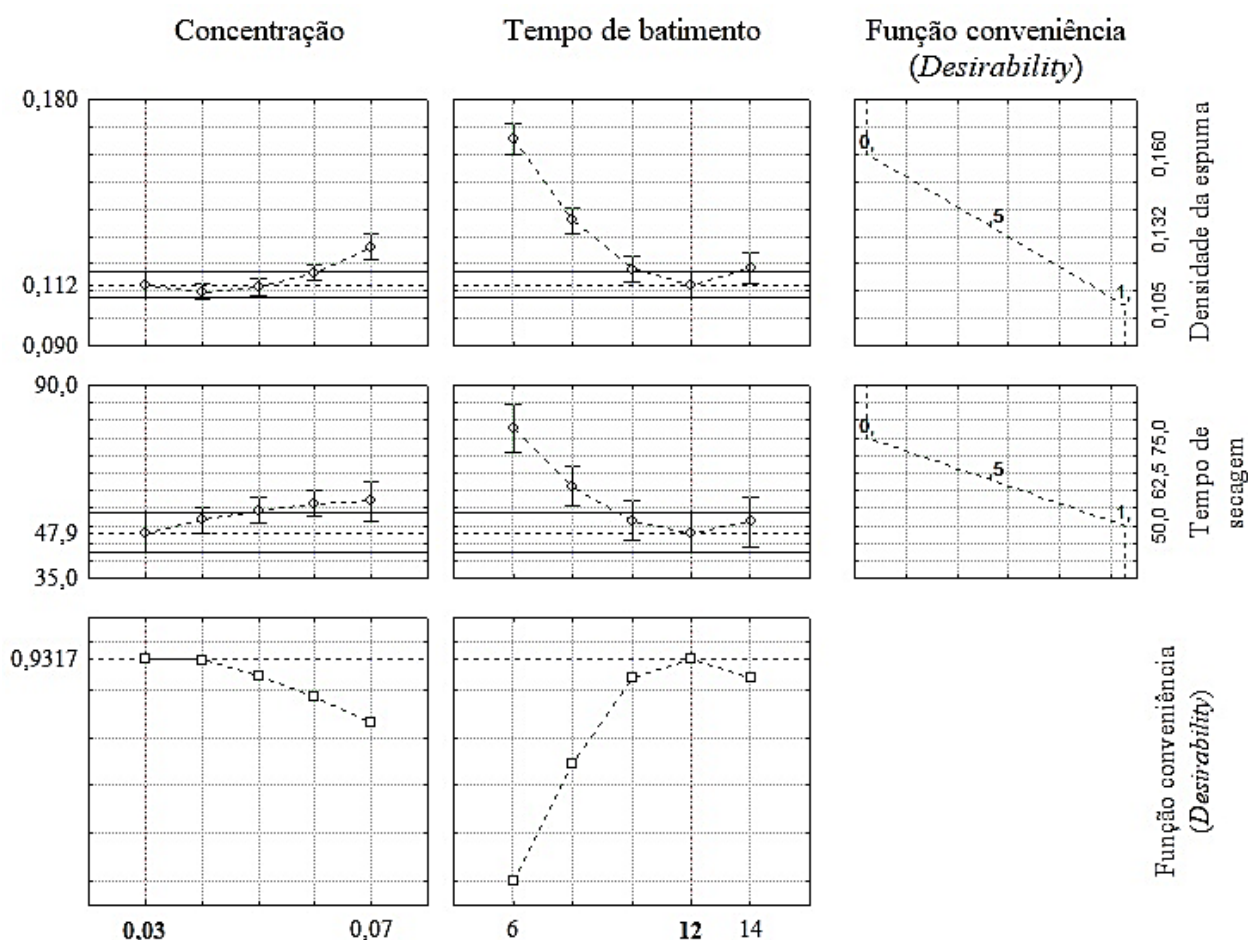


Figura 4.10 - Valores preditos pela função conveniência (método *desirability*) para concentração e tempo de batimento

4.2 Secagem da espuma otimizada em condições variadas de temperatura e espessura da camada

Neste tópico, foram investigados os efeitos das variáveis de processo, temperatura e espessura da camada de espuma, sobre a umidade, atividade de água e tempo de secagem da espuma de ameixa com o intuito de avaliar a melhor condição operacional para secagem desta fruta. A espuma foi preparada na condição de processo otimizada na seção anterior (3% p/p de albumina de ovo na formulação e 12 minutos de tempo de batimento). Os experimentos foram conduzidos de acordo com o planejamento fatorial completo 3^2 , com três réplicas no ponto central, composto de duas variáveis independentes: espessura da espuma (0,8, 1,3 e 1,8 cm) e

temperatura do ar de secagem (60, 70 e 80 °C). Foi realizada também a aplicação de 11 modelos matemáticos de camada delgada a fim de analisar qual descreve melhor os dados experimentais; além disso foram calculados os números adimensionais e a difusividade efetiva para todas as condições analisadas.

4.2.1 Características da secagem

As curvas de secagem para as espumas de ameixa são mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12. Os dados são apresentados na forma de razão de umidade (Figura 4.11) e taxa de secagem (Figura 4.12) todas em função do tempo de secagem. As curvas exibidas para as condições de espessura (0,8, 1,3 e 1,8 cm) e temperatura (60, 70 e 80 °C) evidenciaram a influência das variáveis independentes sobre o tempo e a taxa de secagem.

Como esperado, o tempo de secagem foi menor quando temperaturas mais altas foram aplicadas conforme é mostrado na Figura 4.11. Comparando as curvas das espessuras 0,8 e 1,3 cm nas Figura 4.11A e 4.11C, observa-se que o tempo de secagem foi reduzido em 50 minutos com o aumento da temperatura de 60 para 80 °C, em ambas as espessuras mencionadas. Já para a camada mais espessa (1,8 cm) a redução foi ainda mais acentuada e o tempo de secagem foi reduzido em 150 minutos com o incremento de 20 °C na temperatura do ar de secagem. Este comportamento é causado pelo aumento da taxa de secagem (Tabela 4.5) em vista do maior gradiente de temperatura entre ar e espuma (Akpınar *et al.*, 2003). Quando a camada de espuma é seca, os poros mais finos são abertos e novos poros são criados através do movimento da umidade, com isso a estrutura interna da camada parece ficar ainda mais porosa. Além disso, o encolhimento causa rachaduras ao longo da profundidade da camada de espuma, resultando em condições favoráveis à transferência de massa dentro do material, uma vez que a resistência ao atrito para o transporte de umidade é reduzida e o processo de secagem pode ser finalizado relativamente rápido (Sankat & Castaigne, 2004).

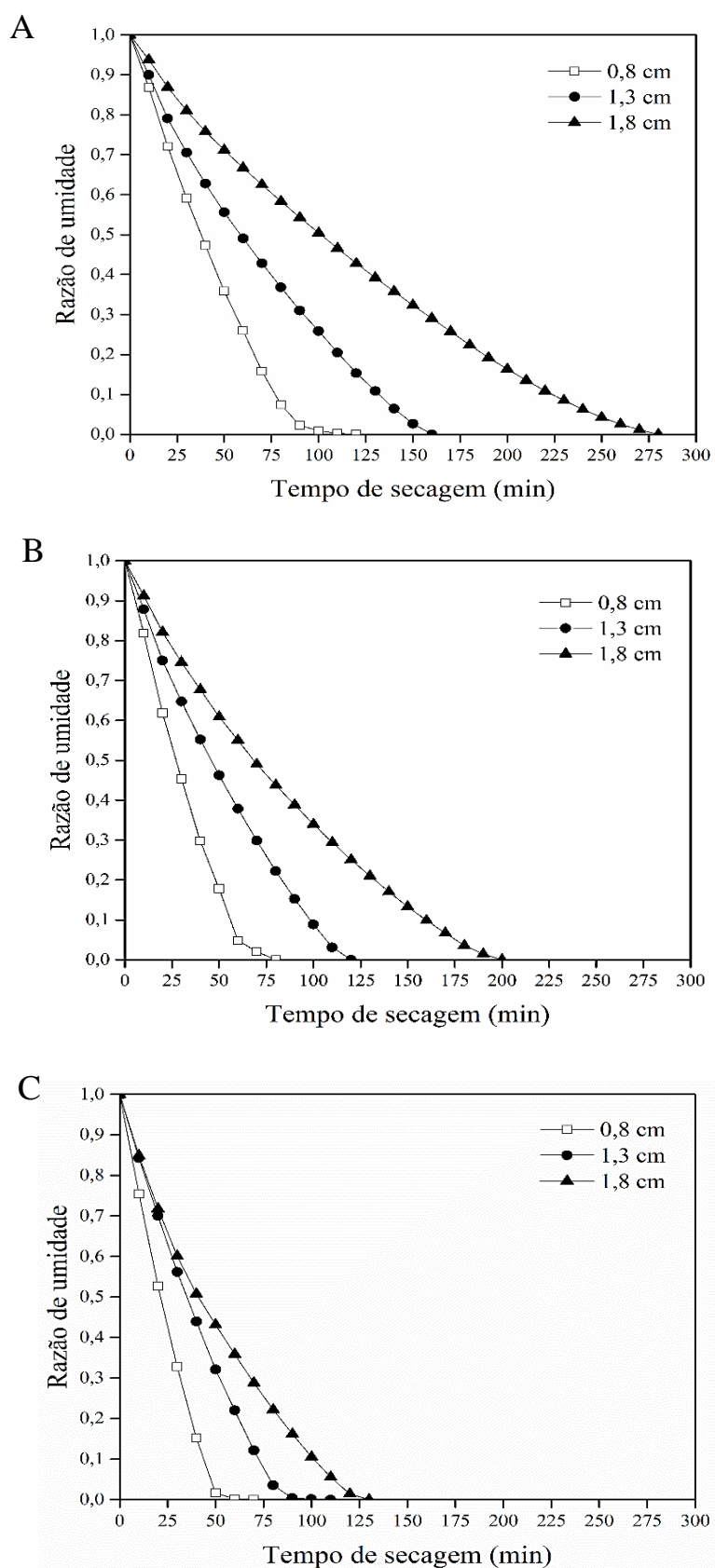


Figura 4.11 - Razão de umidade versus tempo de secagem para a espuma de ameixa a diferentes espessuras de camada e temperaturas do ar (A) 60 °C; (B) 70 °C; (C) 80 °C

As curvas exibidas na Figura 4.12 evidenciam que o processo ocorreu em um período de taxa decrescente, indicando que o movimento da umidade através da estrutura porosa do produto é provavelmente governado pela difusão (Salahi *et al.*, 2015), confirmando que a umidade removida foi impulsionada internamente pela absorção de energia e pela transferência de massa interna que controla o processo de secagem (Kumar & Sagar, 2014).

A lei difusional de Fick é utilizada para embasar o fenômeno transiente de transferência de massa em espumas conforme pode ser evidenciado nos estudos de Franco *et al.* (2015) para a secagem de Yacon e de Dehghannya *et al.* (2018b) para a secagem de suco de lima. A falta de uma taxa de secagem constante pode ser atribuída à natureza da umidade: a água superficial livre pode estar presente na forma de suspensão e solução de células, como açúcares e outras moléculas, com pressão de vapor abaixo da água pura, fato também observado na secagem da camada de espuma de bananas (Thuwapanichayanan *et al.* 2008).

Na Figura 4.12, verificam-se dois períodos de taxa decrescente. O primeiro corresponde à perda de água livre que estava disponível livremente em torno das matrizes sólidas e podia ser transportada facilmente pelo fluxo capilar e por difusão de vapor. No entanto, a remoção da água do interior da camada de espuma para a superfície exposta ao ar de secagem não foi rápida o suficiente para manter a superfície úmida. Assim, as taxas de secagem nesse período diminuíram gradualmente com a diminuição do teor de umidade. Lim *et al.* (1995) relataram que o teor de umidade correspondente à água ligada varia de 0,11 g água/g pó seco a 0,21 g água/g pó seco, dependendo do tipo de fruta. Assim, a taxa de secagem muito baixa no segundo período de taxa decrescente ocorre provavelmente porque há pouca água livre disponível e a difusão da água na superfície é o principal mecanismo que controla o transporte da umidade. Tal efeito da temperatura na secagem em camada de espuma foi observado por Azizpour *et al.* (2014) em seu estudo sobre a secagem de espuma de camarão e por outros autores (Erenturk *et al.*, 2004; Doymaz, 2006; Goyal *et al.*, 2007) que estudaram a secagem de alimentos em camada delgada.

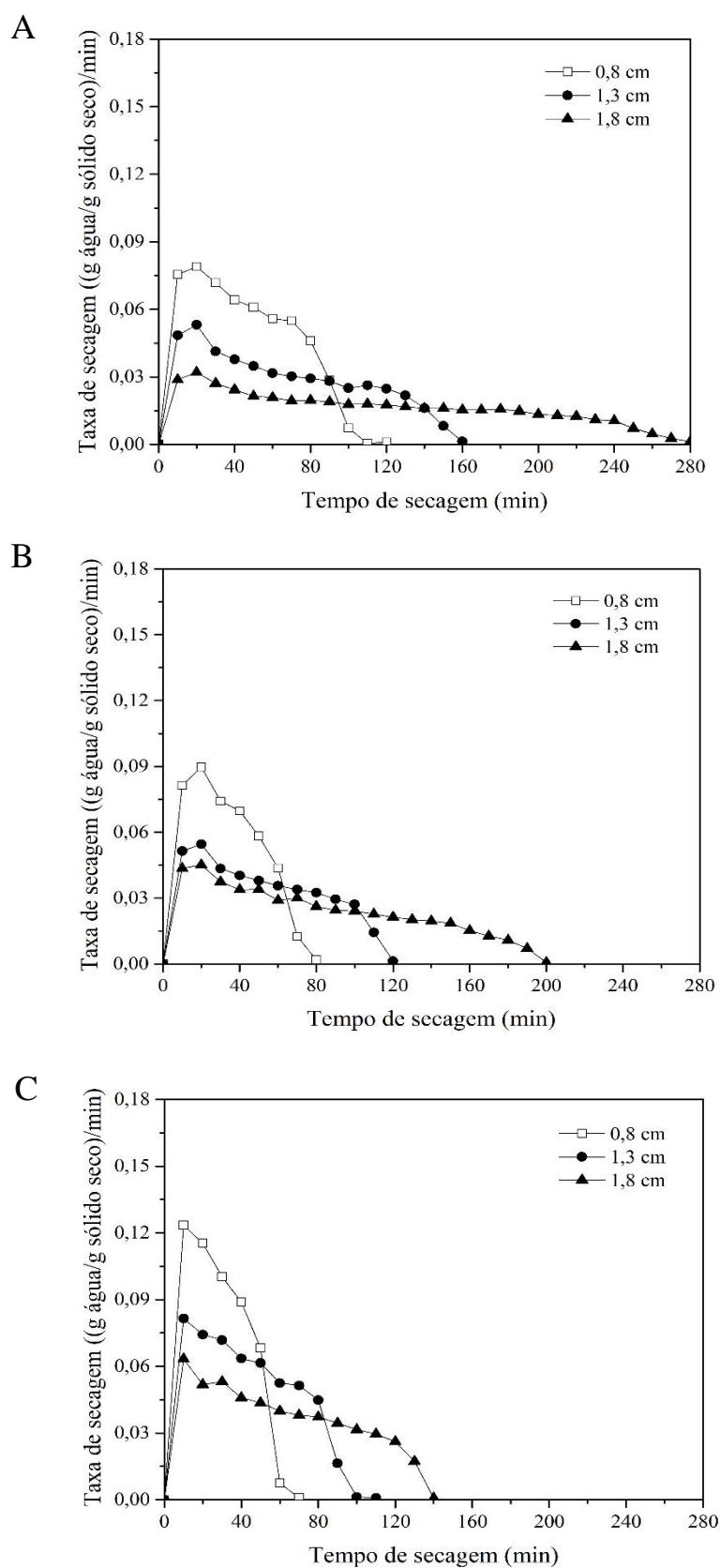


Figura 4.12 - Taxa de secagem versus tempo de secagem para a espuma de ameixa a diferentes espessuras de camada e temperaturas do ar (A) 60 °C; (B) 70 °C; (C) 80 °C

Outro fator que influenciou substancialmente o tempo de secagem foi a espessura da camada de espuma. Analisando o efeito da espessura para a mesma condição de temperatura, observa-se na Figura 4.11 que a 60 °C, o tempo do processo de secagem foi aumentado em 160 minutos quando a espessura foi alterada de 0,8 cm para 1,8 cm, sendo este o aumento mais expressivo. Por sua vez, a 70 °C e 80 °C, o tempo de secagem foi aumentado em 120 e 70 minutos, respectivamente, quando a espessura variou de 0,8 para 1,8 cm. Resultados semelhantes foram relatados para a secagem de espumas de mangas (Rajkumar *et al.*, 2007), tamarindo (Vernon-Carter *et al.*, 2001) e mamão (Kandasamy *et al.*, 2012). A espessura aumentada reduz a taxa de difusão de umidade devido ao caminho mais longo que a umidade precisa superar para alcançar a superfície do produto. Além disso, a transferência de calor é mais eficiente em espessuras mais baixas, pois a penetração mais rápida do calor induz a difusão da umidade para começar em um tempo mais curto (Djaeni *et al.*, 2013).

4.2.2 Difusividade efetiva e energia de ativação

Em processos nos quais há movimento interno de umidade, mensurar a difusividade efetiva (D_{eff}) é essencial, uma vez que este é um parâmetro importante da transferência de massa e auxilia na avaliação e otimização de processos (Franco *et al.*, 2015). A difusividade efetiva pode explicar o movimento da umidade dentro dos alimentos, difusão molecular, difusão de umidade e vapor, difusão hidrodinâmica e outros mecanismos de transferência de massa (Sangamithra *et al.*, 2015). O coeficiente de difusão avalia as relações entre todos os parâmetros efetivos na transferência de massa.

Como característica natural dos materiais biológicos, as variações da difusividade efetiva durante a secagem são uma função complexa da temperatura, teor de umidade inicial, porosidade, densidade e reações de diferentes substâncias (amido, gordura e proteína) com a água. Temperaturas mais altas resultantes do aumento da pressão dentro da espuma podem aumentar o D_{eff} . Diferentemente da temperatura, o aumento da viscosidade pode causar resistência ao fluxo de umidade e difusão através dos tubos capilares. Além disso, a espessura da camada de espuma também afeta a difusividade efetiva, que aumenta com a elevação da espessura, uma vez que a umidade percorre uma distância maior em camadas mais espessas (Salahi *et al.*, 2015). O coeficiente efetivo de difusão de umidade em materiais com características semelhantes às da espuma é maior do que em materiais com baixa porosidade,

porque as bolhas de ar aumentam a porosidade e podem melhorar a remoção de umidade nesses materiais porosos (Sangamithra *et al.*, 2015).

O D_{eff} tem um impacto fundamental na cinética de secagem. Esse coeficiente é essencial no processo de secagem, e altos valores de D_{eff} podem ser traduzidos em taxas de secagem mais elevada e tempos de secagem mais curtos. Conforme já foi citado anteriormente, o coeficiente de difusão varia em função da temperatura e do teor de umidade da espuma durante a secagem. Quando é estimado considerando a variação simultânea dessas duas variáveis, os resultados serão mais exatos e precisos (Kumar *et al.*, 2014). Na Tabela 4.4 são exibidos os valores estimados de D_{eff} para todas as condições estudadas. Observa-se que a difusividade efetiva aumentou com a temperatura e com a elevação da espessura da espuma. Os valores de D_{eff} variaram entre $8,185 \times 10^{-9}$ e $3,360 \times 10^{-8}$ m²/s. Essa observação é consistente com os resultados obtidos por Rajkumar *et al.* (2007) para a secagem de espuma de manga, Salahi *et al.* (2015) para a espuma de melão e Franco *et al.* (2015) para a secagem de espuma de yacon. Na Tabela 4.4 também são exibidos os valores da resistência difusiva ao transporte de umidade, do tempo e das taxas médias de secagem para cada condição do planejamento experimental onde se observa que, apesar da maior difusividade efetiva obtida para as espumas mais espessas, a secagem ocorreu em taxas mais baixas e em tempos mais longos. Este resultado pode ser justificado pela maior resistência ao transporte difusivo de umidade. No cálculo da resistência ao transporte difusivo (L/D_{eff}), o aumento da espessura contribuiu mais para o aumento da resistência do que a diminuição da difusividade efetiva, justificando-se assim a melhor performance da secagem das espumas mais finas.

A difusividade efetiva foi relacionada com a temperatura através do modelo de Arrhenius transformado linearmente, sendo a energia de ativação (E_a) estimada para cada condição de espessura a partir da inclinação da reta para cada série mostrada na Figura 4.13. A transformação linear da equação de Arrhenius (Eq. 3.7) facilitou o cálculo da energia de ativação através das curvas de $\ln(D_{\text{eff}})$ versus o inverso da temperatura absoluta ($1/T$), conforme mostra a Figura 4.13. Os valores estimados para a energia de ativação foram: 29,068 kJ/mol·K, 30,411 kJ/mol·K e 43,490 kJ/mol·K para as espessuras de 0,8, 1,3 e 1,8 cm, respectivamente (Tabela 4.4).

A energia de ativação aumentou com a elevação da espessura da camada de espuma; isso indica que em camadas de espuma mais finas, as moléculas de água podem se mover mais facilmente do que em espumas de espessuras maiores, ou seja, os dados obtidos comprovam

que a secagem em camada de espuma por ar quente, requer mais energia para retirar a água do material à medida que a espessura aumenta. Resultados semelhantes também foram relatados por Azizpour *et al.* (2013) e Salahi *et al.* (2015).

Tabela 4.4 – Dados sobre a secagem da espuma de ameixa

Temperatura (°C)	Espessura (cm)	Tempo de secagem (min)	Taxa de secagem média ((g água/g pó seco)/min)	Resistência difusiva (s/m)	Difusividade efetiva (m ² /s)	R ²	Energia de ativação (kJ/mol.K)
60	0,8	120	0,0419	977,5	8,184 x 10 ⁻⁹	0,949	
70	0,8	80	0,0498	718,1	1,114 x 10 ⁻⁸	0,953	29,068
80	0,8	70	0,0631	539,1	1,484 x 10 ⁻⁸	0,951	
60	1,3	160	0,0285	1048,4	1,240 x 10 ⁻⁸	0,951	
70	1,3	120	0,0326	793,2	1,639 x 10 ⁻⁸	0,949	30,411
80	1,3	110	0,0433	638,8	2,312 x 10 ⁻⁸	0,956	
60	1,8	280	0,0160	1306,2	1,378 x 10 ⁻⁸	0,958	
70	1,8	200	0,0236	884,5	2,035 x 10 ⁻⁸	0,950	43,490
80	1,8	140	0,0369	535,7	3,360 x 10 ⁻⁸	0,965	
70	1,3	110	0,0354	775,2	1,677 x 10 ⁻⁸	0,942	
70	1,3	120	0,0326	797,1	1,631 x 10 ⁻⁸	0,949	
70	1,3	120	0,0326	795,6	1,634 x 10 ⁻⁸	0,950	

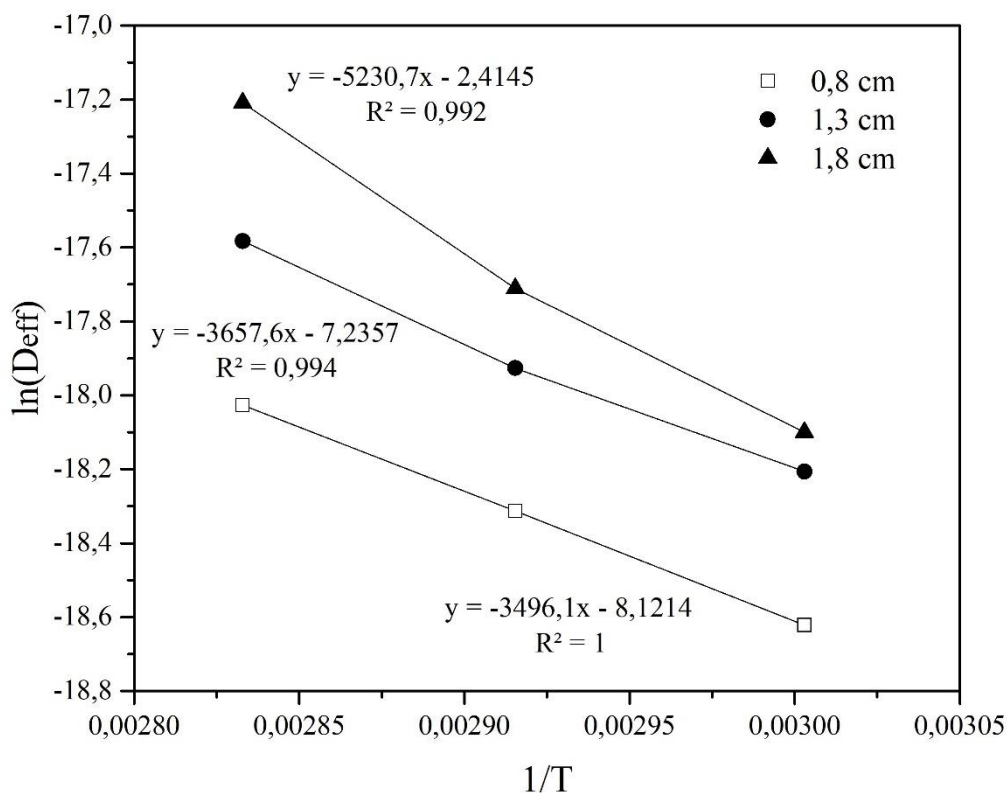


Figura 4.13 – Influência da temperatura do ar na difusividade efetiva

4.2.3 Umidade do pó e atividade de água

Nos alimentos, a água pode estar disponível de duas formas: molécula livre ou ligada. O teor de umidade fornece a medida quantitativa de toda a água presente na amostra (ligada e não ligada), podendo ser utilizado como um parâmetro indicativo de propensão à deterioração ou contaminação do alimento. No entanto, tem sido constatadas diferenças na estabilidade de alimentos com o mesmo conteúdo de umidade e, por esta razão, o valor da umidade sozinho é insuficiente para indicar a perecibilidade do produto, uma vez que não leva em consideração a interação da água com outros componentes do alimento, sendo necessária a análise de outro fator relevante: a atividade de água (Welti & Vergara, 1997). O percentual de umidade dos pós de ameixa, neste estudo, variou de 2,7 até 7,1%, os quais são semelhantes aos encontrados na literatura para outros alimentos.

Rajkumar *et al.* (2007) estudaram a secagem da manga em camada de espuma utilizando albumina (10%) como agente espumante e carboximetilcelulose (0,5%) como estabilizante,

secando a espuma a 60 °C e com 1 cm de espessura de camada obtiveram um pó com 5,56% de umidade final. Thuwapanichayanan *et al.* (2008) realizaram a secagem de espuma de banana com 5 mm de espessura e em diferentes temperaturas do ar, o que resultou em uma umidade final de 3 %. Franco *et al.* (2015) estudaram a secagem da espuma de yacon a partir do suco e do suco concentrado desta tuberosa e analisaram diferentes condições de espessura (0,5, 1,0 e 1,5 cm) e temperatura do ar (50, 60 e 70 °C) obtendo pós com umidade final variando de 3,5 – 6,6%. Outro estudo relevante foi realizado por Dehghannya *et al.* (2019) que investigaram o efeito da concentração de albumina, espessura da camada e temperatura do ar na secagem da espuma de lima obtendo um pó com umidade final de 4%.

Conforme mencionado anteriormente, a análise da atividade de água (a_w) dos alimentos é um parâmetro importante, uma vez que influencia significativamente a vida útil dos alimentos e a diminuição do seu valor evita o desenvolvimento de microrganismos, diminui a velocidade de reações enzimáticas e retarda o escurecimento não enzimático (Belitz *et al.*, 2009). A redução da atividade da água pode ser atribuída à perda de umidade das amostras em temperaturas mais altas, porque se por um lado a estrutura do alimento é mais porosa a temperaturas elevadas, acelerando a perda de umidade; por outro, as proteínas são desdobradas devido à desnaturação e, portanto, sua capacidade de retenção de água é reduzida, o que por sua vez pode reduzir a atividade de água do pó (Damodaran *et al.*, 2010). Neste estudo, os pós de ameixa apresentaram valores de a_w compreendidos entre 0,245 – 0,354 (Tabela 4.5), o que é bastante favorável à estabilidade dos pós de frutas, indicando que o risco de deterioração do produto é mínimo, uma vez que para valores de a_w entre 0,2 e 0,3 não há risco de proliferação microbiana e há redução das taxas de atividade oxidativa e enzimática, podendo ser armazenados por mais tempo (Rao *et al.*, 2005). Os resultados obtidos para a atividade de água dos pós de ameixa corroboram outros trabalhos que envolveram o processo de desidratação por camada de espuma. A secagem de espumas de figo da Índia à 90°C resultou em pós com 0,31 de a_w (Lisbôa *et al.*, 2012), a desidratação de espuma de yacon a 50, 60 e 70 °C produziu pós com atividade de água de 0,1 a 0,22 (Franco *et al.*, 2016), a espuma de camarão a 45, 60, 75 e 90 °C forneceu pós com a_w variando de 0,126 a 0,251 (Azizpour *et al.*, 2016).

Tabela 4.5 – Valores da umidade e atividade de água dos pós produzidos

Temperatura (°C)	Espessura (cm)	Umidade do pó (g de água/100 g de pó seco)	Atividade de água (aw)
60	0,8	4,307 ± 0,123 ^a	0,318 ± 0,001 ^a
70	0,8	2,777 ± 0,151 ^b	0,248 ± 0,002 ^b
80	0,8	2,690 ± 0,078 ^b	0,245 ± 0,002 ^b
60	1,3	6,877 ± 0,053 ^c	0,325 ± 0,001 ^a
70	1,3	3,597 ± 0,107 ^d	0,294 ± 0,002 ^c
80	1,3	3,327 ± 0,098 ^d	0,252 ± 0,002 ^b
60	1,8	7,100 ± 0,122 ^c	0,354 ± 0,008 ^d
70	1,8	5,497 ± 0,157 ^e	0,327 ± 0,010 ^a
80	1,8	3,603 ± 0,092 ^d	0,271 ± 0,002 ^e

Nível de significância $p \leq 0,05$. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as amostras.

4.2.4 Análise estatística

Para ilustrar o efeito da temperatura do ar de secagem e espessura da camada de espuma sobre as variáveis dependentes (umidade, atividade de água, tempo de secagem e taxa média de secagem) foram gerados, pelo software Statistica, os gráficos de Pareto para todas as respostas analisadas no planejamento experimental (Figura 4.14). Observa-se um efeito negativo da temperatura sobre todas as variáveis, exceto para a taxa média de secagem, ou seja, o aumento da temperatura favorece a diminuição da umidade, atividade de água e tempo de secagem e proporciona o aumento da taxa média de secagem. A influência da espessura foi positiva para a umidade, atividade de água e tempo de secagem mostrando que o aumento da espessura resulta em pós com maior umidade e atividade de água, além de tempos de secagem maiores. Para a taxa média de secagem, o efeito da espessura foi negativo, evidenciando-se que espessuras maiores reduzem a taxa média de secagem.

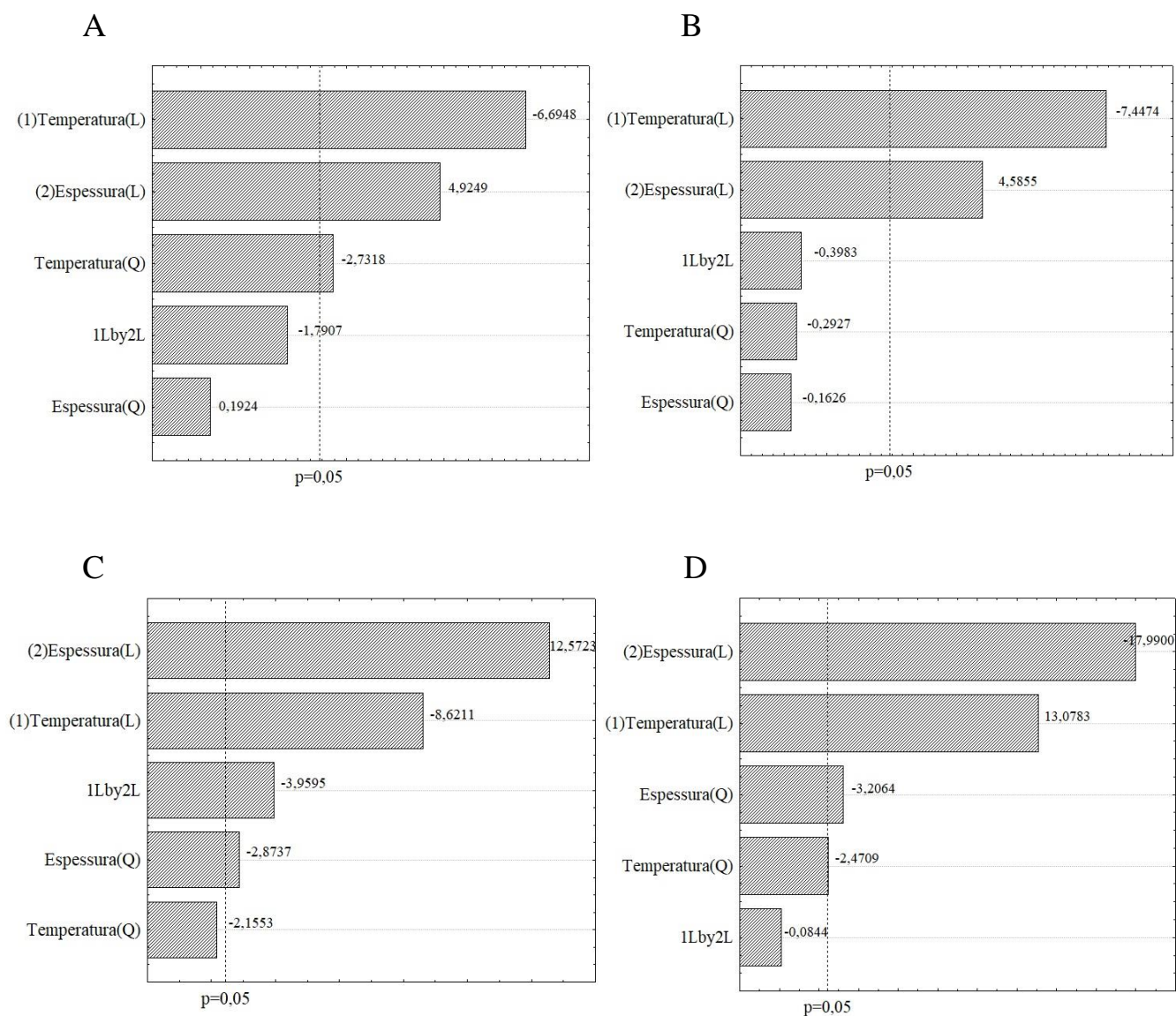


Figura 4.14 - Gráficos de Pareto dos efeitos das variáveis de processo no intervalo de confiança de 95%: (A) Umidade do pó (g de água/100 g de pó seco); (B) Atividade de água; (C) Tempo de secagem (min); (D) Taxa média de secagem ((g água/g pó seco)/min).

A análise de regressão das variáveis dependentes é mostrada na Tabela 4.6. O cálculo do teste F foi efetuado a fim de verificar se os modelos obtidos foram significativos e preditivos. Conforme é evidenciado na Tabela 4.6, os modelos estatísticos obtidos foram significativos para todas as respostas (Teste F – Regressão: $F_{calc}/F_{tab} > 1$), sendo preditivo apenas para a taxa média de secagem, conforme mostra a Tabela 4.6 (Teste F – Falta de ajuste: $F_{calc}/F_{tab} < 1$).

Tabela 4.6 – Análise de regressão das variáveis dependentes

Variável dependente	R ²	Teste F (Regressão)			Test F (Falta de ajuste)		
		F _{calc}	F _{tab}	F _{calc} /	F _{calc}	F _{tab}	F _{calc} /
		QM _R /QM _r	(95%)	F _{tab}	QM _{falta} /QM _{erro}	(95%)	F _{tab}
Umidade (g de água/100 g de pó)	0,930	15,96	4,39	3,64	20,11	9,28	2,17
Atividade de água	0,928	15,35	4,39	3,50	31,60	9,28	3,41
Tempo de secagem (min)	0,978	52,19	4,39	11,90	9,33	9,28	1,01
Taxa média de secagem ((g água/g pó seco)/min)	0,989	102,27	4,39	23,31	2,22	9,28	0,24

O modelo empírico final não codificado mostra o efeito das variáveis independentes na taxa média de secagem. Os termos não significativos ($p < 0,05$) não foram negligenciados, visto que a omissão prejudicava o resultado do modelo. A equação é apresentada a seguir:

$$TM = 0,1547 - 0,002795.T + 0,00002688.T^2 - 0,06132.L + 0,01395.L^2 - 0,0000150.T.L \quad (4.3)$$

Onde TM é a taxa média de secagem ((g água/g pó seco)/min), T é a temperatura do ar de secagem (°C) e L é a espessura da camada de espuma (cm).

A Figura 4.15 mostra a relação entre os valores preditos e os valores experimentais mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Pode-se verificar que houve boa concordância entre os dados preditos e observados.

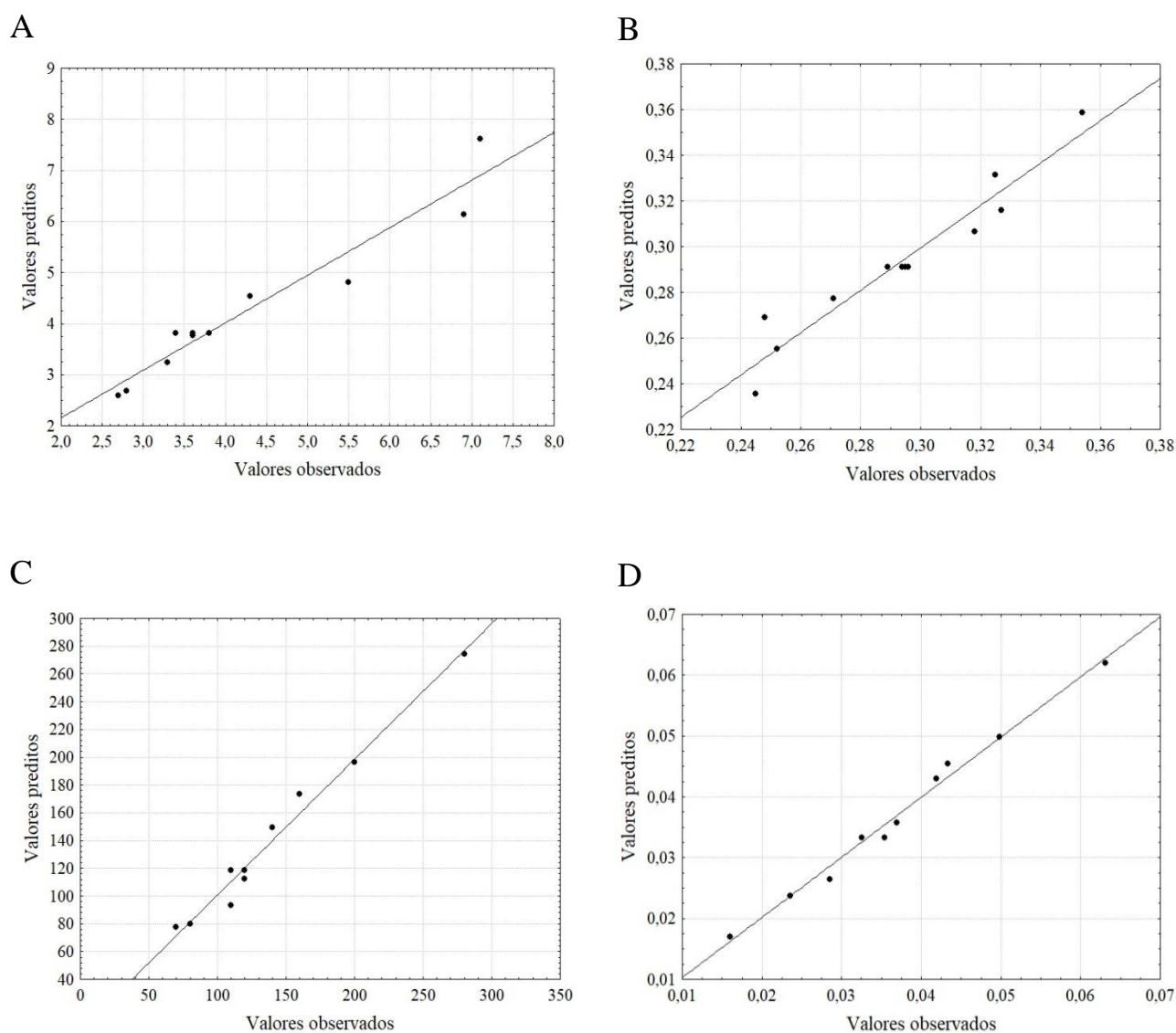


Figura 4.15 – Valores preditos *versus* valores observados. (A) Umidade do pé; (B) Atividade de água; (C) Tempo de secagem; (D) Taxa média de secagem

4.2.5 Análise dos fenômenos de transferência de calor e massa

Na Tabela 4.7 são mostrados os coeficientes e números adimensionais de transferência de calor e massa para o processo de secagem em camada de espuma. Os números de Sherwood e Nusselt expressam os gradientes de concentração e temperatura adimensionais na superfície do material, respectivamente. Esses parâmetros são relevantes para a análise das camadas limite térmica e de concentração que operam com convecção forçada porque fornecem uma medida da transferência de calor e massa por convecção (Incropera & Dewitt, 1990). Conforme indicado pelos números de Sherwood (Sh), o fluxo convectivo de massa é

predominante em relação à difusão de umidade e depende da temperatura do ar e do comprimento característico, razão pela qual seu valor foi mais elevado para a espessura de 0,8 cm, uma vez que esta placa apresenta maior comprimento característico e maior superfície em contato com o ar de secagem. O Sh para as placas com espessuras de 1,3 e 1,8 cm foram próximos o que reforça a dependência com o comprimento característico, cujos valores também se aproximaram. A mesma relação é evidenciada quando analisa-se a camada limite térmica, os altos números de Nusselt compreendidos na faixa de 89,390 a 116,059 para as condições estudadas também evidenciam a predominância da transferência de calor por convecção na camada limite e a dependência com o comprimento característico.

Os valores calculados dos números de Sherwood e Nusselt a partir da superfície da camada da espuma confirmam que tanto para a transferência de massa como de calor nas camadas limite de umidade e de temperatura, o mecanismo da convecção prevalece tanto para a difusão de massa como de calor, o que é motivado pela velocidade do ar (2 m/s), temperaturas aplicadas (60, 70 e 80 °C) e comprimento característico (0,368, 0,250 e 0,244 m). Os maiores números adimensionais de Sherwood e Nusselt para a condição de menor espessura são justificados pela maior área de transferência de calor representada na Tabela 4.7 pelo comprimento característico.

Os números adimensionais de Biot para transferência de calor e massa foram calculados em virtude da sua importância em sistemas de condução térmica que envolvem efeitos convectivos nas fronteiras. Os valores encontrados no intervalo de 0,316 a 0,879 mostram que a resistência térmica condutiva na espuma é menor do que a resistência térmica convectiva através da superfície da camada, principalmente para a condição de menor espessura, indicando que a condução de calor no interior da espuma ocorre mais rápido, em comparação com a convecção térmica entre a superfície da espuma e o ar de secagem, podendo-se considerar a hipótese da existência de uma distribuição uniforme de temperatura na espuma de ameixa. No entanto, observa-se que à medida que a espessura da camada de espuma se eleva, ocorre o aumento da influência da resistência térmica interna, podendo-se atribuir essa condição a elevação tanto do coeficiente convectivo de transferência de calor quanto do comprimento característico associado, meia espessura da placa. Como os números de Biot foram todos menores do que 1, pode-se dizer que a condução térmica é o mecanismo responsável pelo transporte de calor no interior da espuma.

Tabela 4.7 – Coeficientes de transporte e números adimensionais de transferência calor e massa

Temperatura (°C)	Espessura (cm)	Sh	Nu	h (W/m ² .K)	h_m (m/s)	Comprimento característico (m)	Bi	Bi_m	Comprimento característico (m)
60	0,8	109,827	116,059	9,065	0,00954		0,318	9330,230	
70	0,8	106,891	112,810	9,038	0,00980	0,368	0,317	7038,232	0,008
80	0,8	104,131	109,779	9,017	0,01006		0,316	5421,775	
60	1,3	90,522	95,659	10,998	0,01158		0,627	12140,695	
70	1,3	88,103	92,981	10,965	0,01189	0,250	0,625	9431,421	0,013
80	1,3	85,827	90,483	10,940	0,01220		0,624	6861,117	
60	1,8	89,429	94,504	11,132	0,01172		0,879	15311,588	
70	1,8	87,039	91,858	11,099	0,01204	0,244	0,876	10646,231	0,018
80	1,8	84,791	89,390	11,074	0,01235		0,874	6616,794	

Sh = Número de Sherwood

Nu = Número de Nusselt

Bi = Número de Biot para transferência de calor

Bi_m = Número de Biot para transferência de massa

h = Coeficiente convectivo de transferência de calor

h_m = Coeficiente convectivo de transferência de massa

Os altos valores para o número de Biot para transferência de massa compreendidos no intervalo de 5421,775 a 15311,588 mostram que a influência da resistência externa sobre o mecanismo de difusão é baixa, sugerindo que a difusão é o mecanismo físico que controla o transporte de umidade dentro da espuma. O Bi_m foi superior para a condição de 1,8 cm de espessura em virtude do maior coeficiente convectivo de transferência de massa e do elevado comprimento característico. No estudo realizado por Schwartzberg & Chao (1982) foi relatado que se $Bi_m > 200$, o erro relativo no coeficiente de difusão, em virtude do fato de se desprezar a resistência externa, é baixo e considerado menor do que 1%.

Com base no que já foi exposto, vale ressaltar que a falta de um período de secagem a uma taxa constante, caracterizado por condições de equilíbrio na interface ar-superfície pode ser atribuída a alta resistência interna à transferência de massa que acarreta no não suprimento de água necessária para manter a superfície do material uniformemente molhada para atingir as condições de equilíbrio com o ar na temperatura de bulbo úmido. A natureza da umidade da espuma que pode estar presente na forma de suspensão e solução (açúcares e outras moléculas), com uma pressão de vapor abaixo daquela da água pura pode justificar também a ausência do período de taxa constante. O mesmo comportamento foi evidenciado para a secagem de bananas em camada de espuma (Thuwapanichayanan *et al.*, 2008) e de espuma de Yacon (Franco, 2015).

4.2.6 Ajuste de modelos matemáticos

Os valores do coeficiente de determinação (R^2), qui-quadrado reduzido (χ^2) e raiz do quadrado médio residual (RQMR) para os onze modelos ajustados aos dados experimentais são mostrados na Tabela 4.8.

Os dados da Tabela 4.8 evidenciam que todos os modelos aplicados forneceram um bom ajuste aos dados experimentais, apresentando coeficientes de determinação acima de 97%, além dos valores de χ^2 e RQMR próximos a zero. Estes parâmetros são importantes para seleção de modelos não-lineares (Franco *et al.*, 2017). De acordo com Roberts (2008), o modelo mais apropriado deve ter o valor de χ^2 próximo a zero e o R^2 próximo a 1, assim como o menor valor de RQMR irá fornecer o modelo com melhor qualidade de ajuste aos dados experimentais.

Tabela 4.8 - Resultados estatísticos para os modelos aplicados a diferentes condições de secagem da espuma de ameixa

Modelos	Condições	0,8 cm			1,3 cm			1,8 cm		
		R ²	χ^2	RQMR	R ²	χ^2	RQMR	R ²	χ^2	RQMR
Newton	60 °C	0,9798	0,0637	0,0043	0,9757	0,0056	0,0618	0,9709	0,0070	0,0661
	70 °C	0,9779	0,0048	0,0669	0,9737	0,0059	0,0639	0,9747	0,0060	0,0672
	80 °C	0,9756	0,0051	0,0646	0,9738	0,0059	0,0609	0,9758	0,0053	0,0678
	Média	0,9778	0,0245	0,0453	0,9744	0,0058	0,0622	0,9738	0,0061	0,0670
Hendersen e Pabis	60 °C	0,9834	0,0038	0,0578	0,9797	0,0051	0,0566	0,9764	0,0063	0,0595
	70 °C	0,9822	0,0041	0,0601	0,9787	0,0053	0,0575	0,9798	0,0052	0,0600
	80 °C	0,9812	0,0043	0,0567	0,9792	0,0053	0,0543	0,9818	0,0043	0,0589
	Média	0,9823	0,0041	0,0582	0,9792	0,0052	0,0561	0,9793	0,0053	0,0595
Logarítmico	60 °C	0,9982	0,0002	0,0136	0,9991	0,0002	0,0117	0,9988	0,0003	0,0132
	70 °C	0,9992	0,0002	0,0125	0,9995	0,0001	0,0090	0,9979	0,0006	0,0196
	80 °C	0,9998	0,0001	0,0062	0,9996	0,0001	0,0072	0,9995	0,0001	0,0099
	Média	0,9991	0,0002	0,0108	0,9994	0,0001	0,0093	0,9987	0,0003	0,0142
Page	60 °C	0,9954	0,0011	0,0306	0,9944	0,0014	0,0297	0,9953	0,0013	0,0265
	70 °C	0,9949	0,0012	0,0323	0,9947	0,0013	0,0289	0,9959	0,0011	0,0272
	80 °C	0,9957	0,0010	0,0272	0,9953	0,0012	0,0260	0,9963	0,0009	0,0267
	Média	0,9953	0,0011	0,0300	0,9948	0,0013	0,0282	0,9958	0,0011	0,0268
Midilli	60 °C	0,9993	0,0002	0,0118	0,9993	0,0002	0,0106	0,9994	0,0002	0,0092
	70 °C	0,9994	0,0002	0,0114	0,9996	0,0001	0,0077	0,9989	0,0004	0,0140
	80 °C	0,9999	0,0000	0,0043	0,9998	0,0001	0,0055	0,9998	0,0001	0,0062
	Média	0,9995	0,0001	0,0092	0,9996	0,0001	0,0079	0,9994	0,0002	0,0098
Distribuição de Weibull	60 °C	0,9994	0,0002	0,0112	0,9998	0,0002	0,0102	0,9998	0,0002	0,0089
	70 °C	0,9992	0,0002	0,0109	0,9998	0,0001	0,0076	0,9999	0,0003	0,0135
	80 °C	0,9999	0,0000	0,0046	0,9998	0,0001	0,0056	0,9998	0,0001	0,0061
	Média	0,9995	0,0001	0,0089	0,9998	0,0001	0,0078	0,9998	0,0002	0,0095
Dois termos	60 °C	0,9992	0,0002	0,0127	0,9992	0,0003	0,0113	0,9989	0,0004	0,0128
	70 °C	0,9993	0,0002	0,0119	0,9995	0,0002	0,0088	0,9981	0,0006	0,0187
	80 °C	0,9998	0,0001	0,0060	0,9996	0,0001	0,0070	0,9995	0,0001	0,0095
	Média	0,9994	0,0002	0,0102	0,9994	0,0002	0,0090	0,9988	0,0004	0,0137
Verma	60 °C	0,9944	0,0014	0,0337	0,9992	0,0002	0,0115	0,9987	0,0004	0,0141
	70 °C	0,9992	0,0002	0,0124	0,9994	0,0002	0,0094	0,9977	0,0007	0,0205
	80 °C	0,9997	0,0001	0,0075	0,9995	0,0001	0,0082	0,9992	0,0002	0,0120
	Média	0,9978	0,0006	0,0179	0,9994	0,0002	0,0097	0,9985	0,0004	0,0155
Dois termos exponencial	60 °C	0,9798	0,0046	0,0637	0,9919	0,0021	0,0360	0,9918	0,0022	0,0352
	70 °C	0,9928	0,0017	0,0383	0,9919	0,0020	0,0355	0,9930	0,0016	0,0355
	80 °C	0,9936	0,0015	0,0333	0,9927	0,0018	0,0322	0,9941	0,0014	0,0336
	Média	0,9887	0,0026	0,0451	0,9922	0,0020	0,0346	0,9930	0,0017	0,0348
Aproximação por difusão	60 °C	0,9992	0,0002	0,0129	0,9992	0,0002	0,0115	0,9987	0,0004	0,0141
	70 °C	0,9992	0,0002	0,0124	0,9994	0,0002	0,0094	0,9977	0,0007	0,0205
	80 °C	0,9997	0,0001	0,0075	0,9995	0,0001	0,0082	0,9992	0,0002	0,0120
	Média	0,9994	0,0002	0,0109	0,9994	0,0002	0,0097	0,9985	0,0004	0,0155
Wang Singh e	60 °C	0,9996	0,0000	0,0087	0,9994	0,0001	0,0096	0,9989	0,0003	0,0127
	70 °C	0,9995	0,0001	0,0098	0,9995	0,0001	0,0084	0,9985	0,0004	0,0165
	80 °C	0,9997	0,0001	0,0069	0,9996	0,0001	0,0077	0,9994	0,0001	0,0103
	Média	0,9996	0,0001	0,0085	0,9995	0,0001	0,0086	0,9989	0,0003	0,0132

De acordo com a análise estatística dos modelos de camada delgada (Tabela 4.8), a Distribuição de Weibull apresentou o maior R^2 e menores χ^2 e RQMR, portanto, pode ser considerado o que melhor descreve o processo de secagem nas condições testadas. O modelo de Distribuição de Weibull, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 4.9, também foi o modelo com maior qualidade de ajuste para descrever os processos de secagem de espuma de camarão (Azizpour *et al.*, 2014) e de espuma de melão (Salahi *et al.*, 2015) quando comparado a outros modelos de camada delgada.

A constante de secagem e os coeficientes do modelo de Distribuição de Weibull para as condições avaliadas neste estudo são apresentados na Tabela 4.9. A Figura 4.16 mostra a relação entre a razão de umidade predita pelo modelo e os valores experimentais de todos os testes e confirma a validação do modelo de Distribuição de Weibull. Evidencia-se que houve boa concordância entre os dados preditos e experimentais.

Tabela 4.9 - Parâmetros do modelo de Distribuição de Weibull aplicado aos dados experimentais

Temperatura (°C)	Espessura (cm)	Parâmetros do modelo			
		a	b	k	n
60	0,8	-0,06902	-1,0534	0,004061	1,39387
70	0,8	-0,09466	-1,0899	0,007367	1,34327
80	0,8	-0,05384	-1,0444	0,008522	1,42279
60	1,3	-0,82894	-1,8317	0,007478	0,92174
70	1,3	-0,67098	-1,6706	0,008078	0,99168
80	1,3	-0,09164	-1,0755	0,000528	1,34025
60	1,8	-0,64031	-1,6386	0,004365	0,95688
70	1,8	-0,44608	-1,4450	0,006917	0,97315
80	1,8	-0,44697	-1,4539	0,015265	0,89840

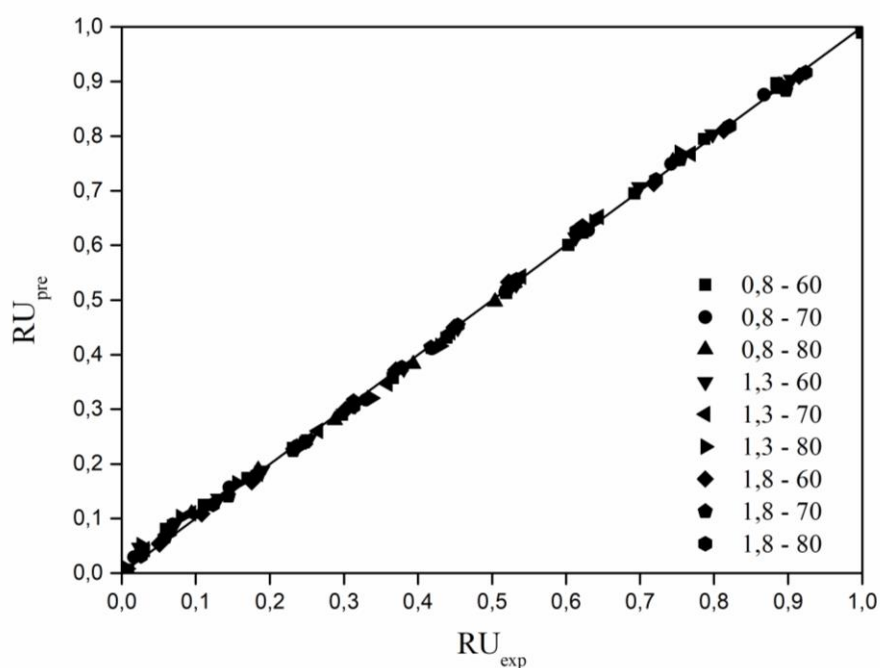


Figura 4.16 - Valores preditos versus observados para o modelo de Distribuição de Weibull

4.2.7 Função conveniência ou método *desirability*

Neste capítulo, foram analisados os efeitos da temperatura do ar de secagem e da espessura da camada de espuma sobre as variáveis: tempo de secagem, taxa média de secagem, umidade e atividade de água. Com o intuito de obter os valores para as variáveis independentes que fornecessem as melhores condições tanto para o processo quanto ao produto, foi aplicado o método *desirability* (Figura 4.17) com base nos critérios estabelecidos para cada variável dependente, atribuindo 0 para os valores não desejados e 1 para aqueles que forneceria as melhores condições. Ou seja, para as variáveis umidade, atividade de água e tempo de secagem atribuiu-se 1 para os menores valores obtidos no planejamento, uma vez que processos mais rápidos e produtos com menor quantidade de água são almejados. Já para a taxa média de secagem o valor 1 foi direcionado ao maior resultado, visto que taxas maiores são desejadas. Com isso, foram obtidos os valores de 0,8 cm para a espessura da camada de espuma e 80 °C para a temperatura do ar, os quais forneceram uma função conveniência de 98,54%, bastante satisfatória uma vez que 100% é o valor máximo desejado.

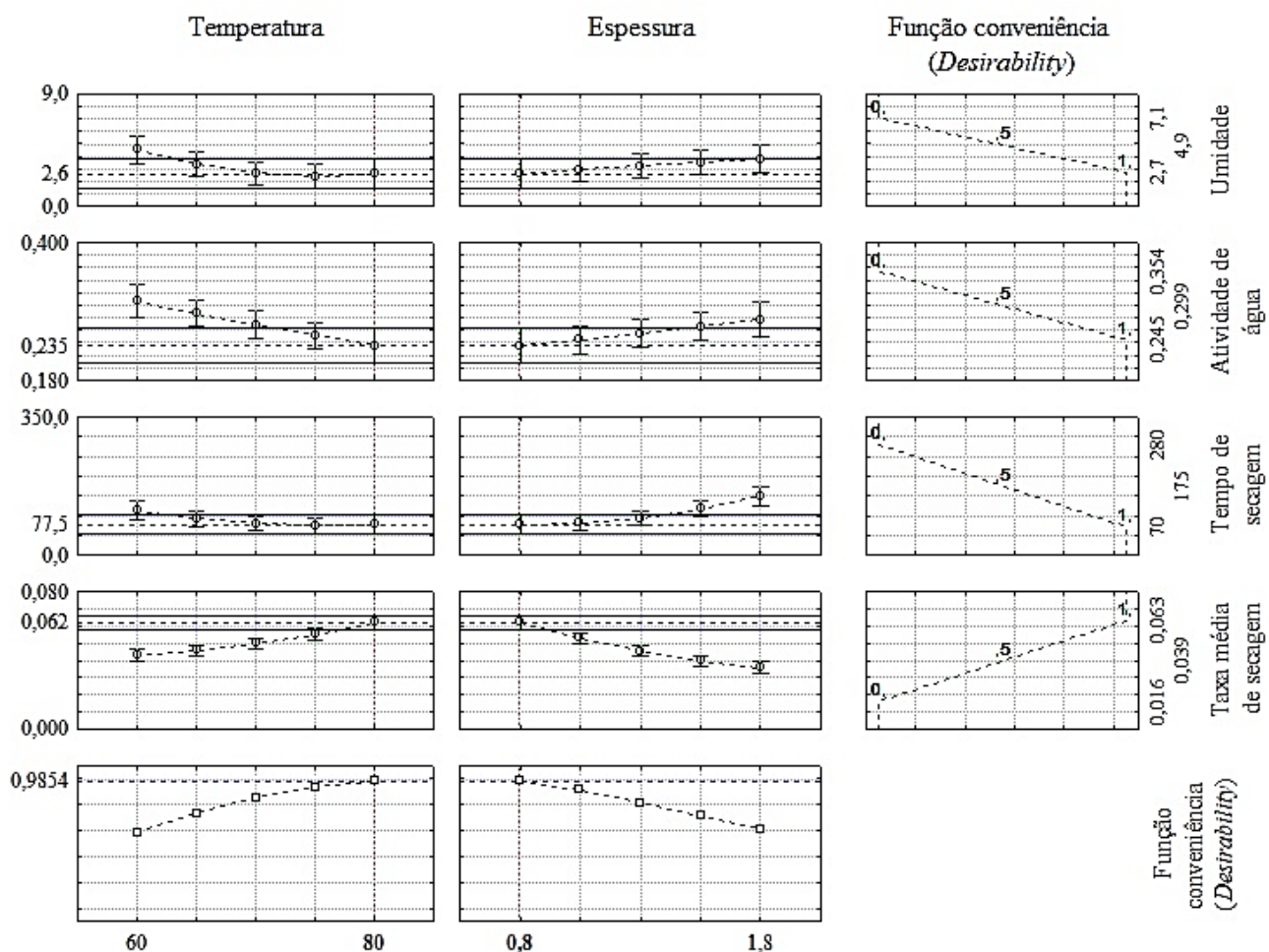


Figura 4.17 - Valores preditos pelo método *desirability* para temperatura e espessura

4.3 Estudo da influência da temperatura nas propriedades físico-químicas e compostos bioativos dos pós de ameixa

Neste tópico, foi investigada a influência da temperatura sobre as propriedades físico-químicas e compostos bioativos. Os experimentos foram realizados utilizando a espuma na condição de processo otimizada anteriormente (3% p/p de albumina de ovo na formulação, 12 minutos de tempo de batimento e 0,8 cm de espessura de camada) e quatro temperaturas de secagem: 50, 60, 70 e 80 °C (os ensaios foram realizados em duplicata). Os pós obtidos nas quatro temperaturas aplicadas foram comparados com o pó de ameixa produzido por

liofilização. Para a liofilização não foi utilizada espuma, apenas a polpa de ameixa pura (cerca de 280 gramas) sem a adição de albumina de ovo.

4.3.1 Secagem das espumas

As curvas de secagem para as diferentes temperaturas do ar aplicadas podem ser vistas nas Figura 4.18 e 4.19. Evidencia-se que a temperatura do ar influenciou o tempo e a taxa de secagem da espuma de ameixa, provocando o aumento da taxa de secagem à medida que a temperatura se elevou e, conseqüentemente, a redução do tempo do processo em cada experimento analisado, confirmando o que já havia sido discutido previamente. O tempo de secagem foi reduzido de 140 para 55 min quando a temperatura foi aumentada em 30 °C. Tendência semelhante também foi evidenciada no estudo realizado por Nistor *et al.* (2017) para secagem de beterraba vermelha em secador convectivo a 50, 60 e 70 °C, cujo aumento da temperatura de 50 para 70 °C acarretou na redução do tempo de secagem em 210 minutos.

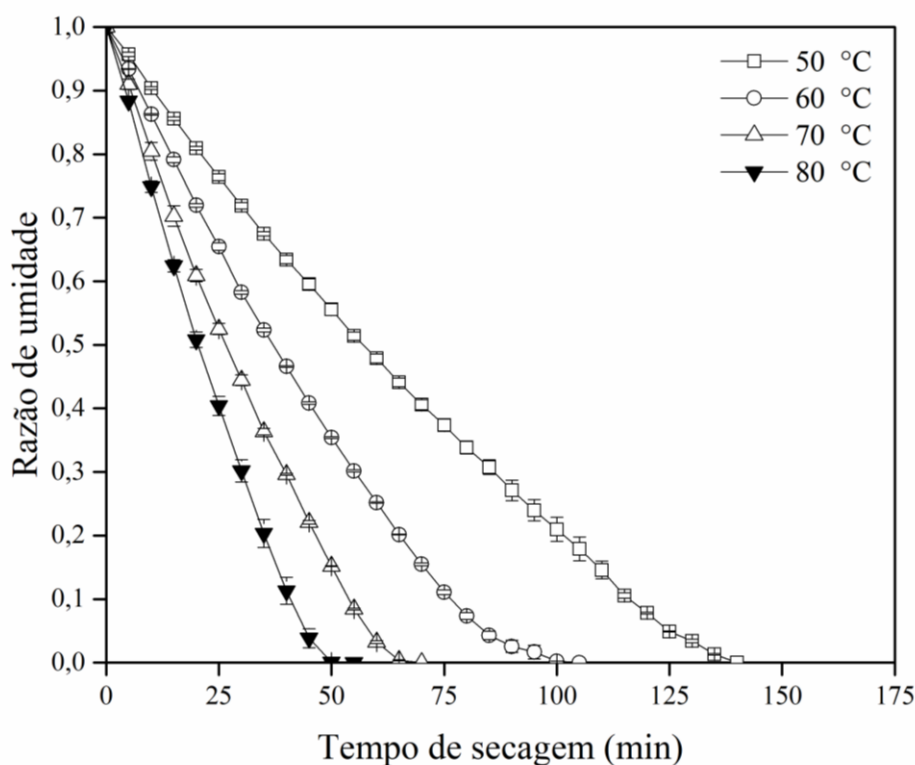


Figura 4.18 - Razão de umidade versus tempo de secagem

Neste estudo, a taxa de secagem média variou de 0,0302 a 0,0822 g de água por g de pó seco por minuto e, conforme pode ser visto na Figura 4.19, a taxa de secagem aumentou nos estágios iniciais e depois caiu durante o período de taxa decrescente. Durante o processo de secagem da espuma de ameixa, foram observados dois períodos de queda. No início da secagem, a taxa de evaporação é mais elevada porque a umidade na superfície da camada é maior. No final deste estágio, toda a água livre na superfície evapora, o que resulta na taxa de secagem diminuindo com uma inclinação mais acentuada. No período de taxa decrescente, a resistência contra a remoção de umidade aumenta e a inclinação da curva de secagem diminui. Nesta fase, o mecanismo de controle da taxa de secagem é a difusão (Salahi *et al.*, 2015).

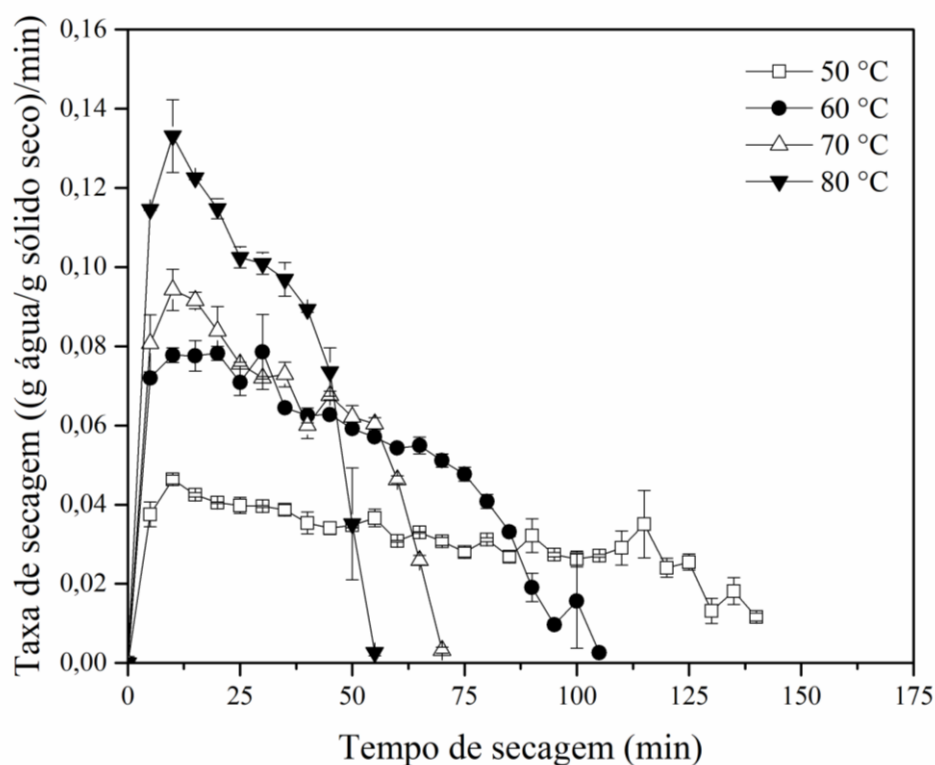


Figura 4.19 - Taxa de secagem versus tempo de secagem

Os dados referentes ao tempo, a taxa média de secagem e a difusividade efetiva, bem como os respectivos coeficientes de determinação (R^2) são exibidos na Tabela 4.10. As difusividades efetivas calculadas a partir do ajuste do modelo de Fick aos dados experimentais da razão de umidade em função do tempo ficaram compreendidas entre $4,891 \cdot 10^{-9}$ e $1,468 \cdot 10^{-8}$ m^2/s , cujas curvas apresentaram coeficientes de determinação em torno de 94%, valores coerentes com o método de camada de espuma.

Tabela 4.10 - Dados sobre a secagem da espuma de ameixa a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Tempo de secagem (min)	Taxa de secagem média ((g água/g pó seco)/min)	Difusividade efetiva (m ² /s)	R ²
50	140 ± 0,0 ^a	0,0302 ± 0,002 ^a	4,891 x 10 ⁻⁹	0,934
60	105 ± 0,0 ^b	0,0495 ± 0,002 ^b	7,951 x 10 ⁻⁹	0,940
70	70 ± 0,0 ^c	0,0598 ± 0,002 ^b	1,106 x 10 ⁻⁸	0,938
80	55 ± 0,0 ^d	0,0822 ± 0,004 ^c	1,468 x 10 ⁻⁸	0,939

Nível de significância $p \leq 0,05$. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as amostras.

4.3.2 Densidades e parâmetros de fluidez dos pós

A densidade é um dos parâmetros críticos que afetam as propriedades funcionais do pó (Sangamithra *et al.*, 2016). As análises das densidades aparente e compactada são de baixo custo e muito úteis para produtos em pó por gerarem resultados que indicam uma perspectiva do empacotamento, do arranjo das partículas e do perfil de compactação de um material (Shishir *et al.*, 2014). A densidade aparente típica de produtos secos a partir da espuma é em torno de 0,2 a 0,6 g/cm³ (Dehghannya *et al.*, 2018a) e para o pó de ameixa variou entre 0,222 e 0,323 g/cm³, já a densidade compactada ficou entre 0,266 e 0,398 g/cm³, enquanto a densidade absoluta apresentou valores entre 0,637 e 0,965 g/cm³. Para as três densidades analisadas houve valores com diferenças significativas, conforme dados mostrados na Tabela 4.11.

Observou-se que a densidade aparente dos pós aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem. Esse comportamento pode ser atribuído à diminuição da umidade das amostras em virtude da taxa de evaporação mais acentuada para temperaturas mais altas e com isso obtém-se um pó menos pegajoso e com melhor perfil de compactação. Isso é endossado pelo percentual de aumento da densidade compactada em relação à densidade aparente que para os pós a 50 e 60 °C foi de 47,28 e 49,06%, respectivamente, enquanto para as amostras liofilizada, a 70 e a 80 °C foi de apenas 13,68, 23,08 e 15,17% respectivamente. Quanto à densidade absoluta, a tendência é inversa a apresentada pela aparente, visto que para esta análise

o volume referente aos vazios foi contabilizado através da aplicação de tolueno (utilizado porque não solubiliza o pó) e retirado do volume total da amostra. Isso ocorreu porque temperaturas de secagem maiores favorecem a transferência de calor e massa dentro do material devido ao aumento da taxa de secagem, resultando na remoção facilitada da umidade (Chegini & Ghobadian, 2005). Resultados semelhantes também foram observados para a secagem de tamarindo usando secador de tambor (Jittanit *et al.* 2011) e para a desidratação de espuma de melão em câmara de secagem (Sangamithra *et al.*, 2016). Outro fator importante observado neste estudo está relacionado à estabilidade das espumas, verificou-se que em virtude da formação de espumas mais estáveis não ocorreu o colapso da estrutura do material que causa um aumento nas densidades aparente, compacta e absoluta do pó (Benstain *et al.*, 1993).

Tabela 4.11 - Propriedades de fluidez do pó

	Densidade aparente (g/cm ³)	Densidade compactada (g/cm ³)	Densidade absoluta (g/cm ³)	Razão de Hausner	Índice de Carr (%)
Liofilizada	0,234 ±	0,266 ±	0,701 ±	1,136 ±	11,944 ±
	0,006 ^a	0,000 ^a	0,015 ^a	0,025 ^a	1,944 ^a
50 °C	0,222 ±	0,327 ±	0,965 ±	1,471 ±	32,026 ±
	0,003 ^a	0,005 ^b	0,015 ^b	0,001 ^b	0,026 ^b
60 °C	0,267 ±	0,398 ±	0,904 ±	1,492 ±	32,955 ±
	0,003 ^b	0,002 ^c	0,011 ^b	0,025 ^b	1,136 ^b
70 °C	0,260 ±	0,320 ±	0,692 ±	1,230 ±	18,627 ±
	0,000 ^b	0,008 ^b	0,047 ^a	0,030 ^a	1,961 ^a
80 °C	0,323 ±	0,372 ±	0,637 ±	1,153 ±	13,235 ±
	0,003 ^c	0,002 ^d	0,021 ^a	0,020 ^a	1,471 ^a

Nível de significância $p \leq 0,05$. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as amostras.

A capacidade de fluidez (índice de Carr - IC) e a coesão (razão de Hausner - RH) dos pós de ameixa são mostrados na Tabela 4.11. O IC e RH medem as propriedades de fluxo dos

pós e quanto mais baixos forem esses índices, maior a capacidade de fluxo do pó. Os valores de IC foram encontrados na faixa de 11,944 a 32,955 %, enquanto os valores de RH de pó de ameixa foram encontrados na faixa de 1,136 a 1,492, dependendo da condição de processo e temperatura do ar de secagem. Com base na Tabela 3.6, os pós de ameixa possuem uma fluidez (IC) muito boa quando obtidos por liofilização e pelas temperaturas de 70 e 80 °C (uma vez que não houve diferença significativa), sendo regular para as demais condições. Quanto à razão de Hausner, apresentam alta coesão os pós obtidos a 50 e 60 °C e baixa para os pós produzidos a 70 e 80 °C e por liofilização.

A coesão das partículas de pó é causada principalmente por forças interpartículas, como as forças de van der Waals. Outros fatores, como o intertravamento mecânico, também podem ter influência, principalmente em materiais grossos, se não esféricos (Geldart *et al.*, 2009). Como a maioria dos materiais orgânicos é pó não esférico, isso pode ser uma razão para os pós estudados não serem pós de fluxo livre. A fluidez do pó também pode ser explicada em termos de adesão interparticulada ou viscosidade, que é afetada pelo alto nível de açúcar presente nos alimentos (Bhandari & Howes, 1999).

4.3.3 Propriedades físico-químicas do pó

Neste estudo foi evidenciado, conforme mostrado na Tabela 4.12, que a acidez total titulável, a atividade de água, a higroscopicidade e a umidade são influenciadas pela ação da temperatura do ar de secagem. No entanto, esta variável não exerce efeitos significativos sobre as demais. Verificou-se que a acidez titulável para o pó liofilizado foi 5,799 g de ácido málico por 100 gramas de amostra e para as amostras obtidas por *foam mat* aumentou de 4,022 para 4,668 g de ácido málico por 100 gramas de amostra, quando houve o incremento de 30 °C na temperatura do ar de secagem. O ácido málico, que é um ácido orgânico não volátil e predominante na ameixa, é um dos ácidos orgânicos importantes que dão odor e sabor a frutas, além de atuar como um tampão para equilibrar o pH celular. Neste estudo, foi observado que o aumento na temperatura de secagem provocou um aumento na acidez titulável dos pós. A elevação na temperatura acarretou maiores taxas de evaporação o que leva a menores tempos de secagem e com isso a um menor tempo de exposição do material ao calor favorecendo a preservação dos ácidos orgânicos, visto que temperaturas mais altas do ar de secagem da

espuma facilitam a transferência de calor e massa. O alto valor da acidez titulável da amostra liofilizada corrobora a informação anterior.

Tabela 4.12 - Propriedades físico-químicas dos pós

	Acidez titulável (g de ácido málico/100 g)	Atividade de água (aw)	Solubilidade (g/100 g)	Higroscopicidade (g de água/ 100 g de pó seco)	Proteínas (g/100 g)	Lipídeos (g/100 g)	Umidade (g de água/100 g de pó seco)	Carboidratos (g/100 g)	Fibra bruta (g/100 g)	Cinzas (g/100 g)
Liofilizada	5,799 ± 0,027 ^a	0,237 ± 0,009 ^a	86,908 ± 3,260 ^a	33,410 ± 0,331 ^a	3,240 ± 0,165 ^a	0,381 ± 0,114 ^a	2,522 ± 0,692 ^{ade}	88,676 ± 0,004 ^a	4,354 ± 0,564 ^a	0,827 ± 0,076 ^a
50 °C	4,022 ± 0,027 ^b	0,386 ± 0,003 ^b	76,738 ± 0,891 ^a	18,092 ± 0,812 ^b	12,297 ± 1,691 ^b	0,179 ± 0,004 ^a	6,620 ± 0,060 ^b	74,393 ± 2,068 ^b	3,002 ± 0,286 ^a	3,509 ± 0,157 ^b
60 °C	4,416 ± 0,011 ^c	0,318 ± 0,001 ^c	76,842 ± 6,238 ^a	21,519 ± 0,256 ^c	14,404 ± 0,269 ^b	0,421 ± 0,002 ^a	4,326 ± 0,072 ^c	74,315 ± 0,488 ^b	2,905 ± 0,747 ^a	3,623 ± 0,035 ^b
70 °C	4,438 ± 0,117 ^c	0,248 ± 0,002 ^a	76,505 ± 0,687 ^a	23,692 ± 0,363 ^d	12,888 ± 0,979 ^b	0,278 ± 0,055 ^a	2,895 ± 0,061 ^d	77,146 ± 1,514 ^b	3,319 ± 0,421 ^a	3,475 ± 0,049 ^b
80 °C	4,668 ± 0,026 ^d	0,245 ± 0,002 ^a	75,737 ± 0,391 ^a	23,494 ± 0,398 ^d	12,273 ± 1,064 ^b	0,120 ± 0,098 ^a	1,755 ± 0,066 ^e	78,668 ± 0,666 ^b	3,653 ± 0,335 ^a	3,531 ± 0,022 ^b

Nível de significância $p \leq 0,05$. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as amostras.

O teor de umidade dos pós de ameixa (Tabela 4.12) variou entre 1,755 g/100 g a 6,620 g/100 g, mostrando a baixa disponibilidade de água para crescimento microbiológico e ocorrência de reações químicas tanto do pó liofilizado quanto dos pós obtidos por camada de espuma (Jaya & Das, 2004). O valor mínimo para a umidade do pó foi encontrado quando a temperatura mais alta foi aplicada (80 °C), já o valor máximo foi obtido para a temperatura mais baixa, o que corrobora a correlação negativa entre as duas variáveis. Os valores encontrados neste trabalho são compatíveis aos produtos comerciais de baixa umidade como tomate em pó (3,4 a 4,0 g/100 g), café solúvel (de 4,18 a 5,25 g/100 g) e leite em pó (2 a 3,5 g/100 g), resultando em um produto estável. No estudo de Muñoz-López *et al.* (2018), fatias de ameixa com 2,5 cm de diâmetro e 0,2 cm de espessura foram desidratadas em secador de bandejas vertical a 50, 65 e 80 °C com velocidade do ar de 1 m/s, resultando em um produto final com atividade de água em torno de 0,3 e teor de umidade de 2%; a umidade de equilíbrio foi atingida em 240 minutos para a temperatura de 50°C e 180 minutos para as demais temperaturas, cujos tempos de secagem foram superiores aos apresentados neste capítulo, demonstrando que o processo em camada de espuma é uma alternativa eficaz para a remoção rápida de água do material.

A estabilidade de um produto alimentício está ligada tanto ao teor de umidade quanto à disponibilidade de água no alimento a ser usada para reações químicas (Lewicki, 2004). Quando métodos para conservação de alimentos são estudados, a determinação da atividade de água - parâmetro que expressa a água livre, definido como a razão entre a pressão do vapor de água dos alimentos e a pressão do vapor de água pura na mesma temperatura (Berk, 2009; Franco, *et al.*, 2016) - é crucial, visto que um alimento com alto valor de a_w está mais susceptível ao crescimento microbiano, a maior taxa de atividade enzimática e a reação de Maillard, com isso uma redução na atividade da água a valores próximos de zero favorece a durabilidade do produto (Shaari *et al.*, 2018). Os valores para a_w encontrados para os pós de ameixa (Tabela 4.12) variaram de 0,245 a 0,386, cujos menores valores foram obtidos para os pós liofilizado e a 70 e 80 °C, sem diferença significativa entre os três. Resultados semelhantes também foram relatados por alguns pesquisadores: Breda *et al.* (2012) encontraram a_w na faixa de 0,200 - 0,300 para pós de suco de guavira, Krasaekoopt & Bhatia (2012) relataram um intervalo de 0,320 - 0,350 para o pó obtido da secagem de espumas de iogurte com albumina, Shaari *et al.* (2018) encontraram uma atividade de água na faixa de 0,320 - 0,410 para o pó de abacaxi, Ng

e Sulaiman (2018) obtiveram pó de beterraba com aw no intervalo de 0,392 - 0,457, dentre outros estudos.

A solubilidade é uma das avaliações mais práticas da qualidade do pó, pois descreve o comportamento dos pós em solução aquosa (Michalska *et al.*, 2016). Durante a reidratação, um excelente pó deve molhar instantaneamente, submergir em vez de flutuar e difundir sem inchar (Hogekamp & Schubert, 2003). Os valores para a solubilidade dos pós de ameixa obtidos neste trabalho são mostrados na Tabela 4.12 e variaram entre 75,737 e 76,842 g/100 g, não havendo diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre as amostras analisadas. A boa solubilidade dos pós de ameixa pode ser atribuída ao fato de que o baixo teor de umidade parece estar associado à rápida reidratação (Goula & Adamopoulos, 2008), pois quanto menor o teor de umidade, menos pegajoso é o pó e, portanto, maior será a área de superfície em contato com a água de reidratação (Fazaeli *et al.*, 2012).

A higroscopicidade é a capacidade de um pó alimentar adsorver a água de um ambiente com umidade relativa superior ao teor de umidade de equilíbrio e está relacionada à sua estabilidade física, química e microbiológica. A análise do comportamento higroscópico desses produtos fornece informações essenciais principalmente quando se trata de estabelecer condições de secagem, embalagem e armazenamento (Oliveira *et al.*, 2014). O pó liofilizado foi classificado como o mais higroscópico, visto que obteve o maior valor dentre todas as amostras (33,410 g água/100 g de pó seco). O valor de higroscopicidade do pó de ameixa obtido por camada de espuma apresenta-se na faixa de 18,092 a 23,692 g/100 g, não apresentando diferença significativa ($p \leq 0,05$) para os pós obtidos a 70 e 80 °C. Os pós de ameixa produzidos neste trabalho possuem alta higroscopicidade conforme níveis expostos na Tabela 3.7. Isso ocorre devido à conformação polar da estrutura da ameixa e também da albumina que aumenta a capacidade do pó de atrair moléculas de água ao entrar em contato com o ar circundante (Shaari *et al.*, 2018).

Nos alimentos, as proteínas têm propriedades nutricionais, organolépticas e funcionais (Cecchi, 2009). Dentre as propriedades funcionais das proteínas destacam-se: as propriedades de hidratação (molhabilidade, solubilidade), as relacionadas com interações proteínas-proteínas (formação de gel, coagulação) e as de superfície (emulsificação, formação de espumas) (Ribeiro & Seravalli, 2007). Devido a esta última característica das proteínas, a albumina de ovo foi adicionada às formulações para formar a espuma e manter sua estabilidade durante a secagem e, por isso, os pós de ameixa apresentaram teores significativos de proteínas (Tabela 4.12) que

não são naturais para a fruta fresca, cujo valor médio está em torno de $0,8 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ (TACO, 2011). Com isso, os pós produzidos tiveram o seu valor nutricional enriquecido, uma vez que os valores de proteína variaram de 12,273 a 14,404 g/100g, não apresentando diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre eles, ou seja, as amostras não foram afetadas pela temperatura empregada na secagem.

O baixo teor de gordura das amostras secas é devido a composição da ameixa e da albumina de ovo, que são alimentos com baixo teor de gordura. O teor de gordura para a albumina do ovo é nulo conforme informações fornecidas pelo fabricante e para a ameixa foi quantificado como traços (TACO, 2011). Com isso, confirma-se a partir dos dados que a mistura desses dois compostos não fornece um produto com alto perfil lipídico, conforme foi evidenciado neste estudo, cujos valores de lipídeos variaram de 0,120 a 0,421 g/100g, sem diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre eles.

Os carboidratos estão amplamente distribuídos na natureza e englobam substâncias diversas com estruturas e propriedades funcionais diferentes. A glicose, frutose e sacarose responsáveis pelo sabor doce de vários alimentos, assim como o amido pertencem ao grupo dos carboidratos (Ribeiro & Seravalli, 2007). Por apresentarem esses componentes em sua composição, as ameixas ainda podem ser consideradas fontes de carboidratos, assim como de fibras, taninos, enzimas e minerais, particularmente potássio, fósforo, cálcio e magnésio (Ertekina *et al.*, 2006). Nas ameixas em pó geralmente é evidenciado um aumento da concentração de açúcar em comparação com frutos frescos de ameixa, acompanhados por uma proporção diferente de açúcares individuais (Stacewicz-Sapuntzakis *et al.* 2001). Essa conversão ocorre nas primeiras horas da secagem, quando a alta temperatura rompe a estrutura celular e libera os ácidos da fruta e a invertase que atuam como catalisadores do processo (Wilford *et al.* 1997). Por outro lado, a secagem prolongada pode causar alguma perda de glicose e frutose devido à formação de compostos de escurecimento com aminoácidos (reação de Maillard) e caramelização da sacarose.

A fibra bruta é composta, teoricamente, de materiais que não são digeríveis tanto pelo organismo humano quanto pelo animal, como, por exemplo, a celulose, a lignina e as pentosanas, presentes na estrutura celular das plantas. Apesar da fibra não ter valor nutritivo, ela é necessária para os movimentos peristálticos do intestino (Cecchi, 2009). Neste estudo, foi determinada apenas a fibra bruta que variou de 2,905 a 3,653 g/100g. A determinação da fibra

nas frutas e vegetais é importante por ser um aspecto considerado durante a verificação da maturação do alimento, uma vez que produtos muito maduros têm maior quantidade de fibras.

O resíduo mineral fixo (ou cinza) de um alimento é constituído principalmente de potássio, sódio, cálcio e magnésio, além de pequenas quantidades de alumínio, ferro, cobre manganês e zinco e traços de argônio, iodo, flúor e outros elementos. o material inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica, que é transformada em dióxido de carbono, água e óxido nítrico. Embora o resíduo mineral fixo indique o conteúdo mineral na amostra, ele não representa necessariamente a mesma composição que a matéria mineral originalmente presente nos alimentos, pois pode haver perda por evaporação ou alguma interação entre os constituintes da amostra (Cecchi, 2009). As amostras de pós de ameixa apresentaram cinzas variando de 3,475 a 3,623 g 100 g⁻¹ (Tabela 4.12), não havendo diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre as amostras, mostrando que a temperatura não afeta a composição de resíduo mineral fixo. Frutas, vegetais e tubérculos têm um teor mineral relativamente alto e a ameixa é especialmente rica em cálcio e magnésio (TACO, 2011). No entanto, é importante considerar que a albumina do ovo, usada como agente espumante, apresenta um teor mineral de 1,5 g.100 g⁻¹ (informações fornecidas pelo fabricante).

4.3.4 Compostos bioativos

Os compostos fenólicos nas ameixas são responsáveis pela atividade antioxidante em vários níveis. Eles inibem a oxidação lipídica, especialmente no caso de lipoproteínas de baixa densidade (com efeitos benéficos na prevenção de doenças coronárias) e exibem atividade de quebra de cadeia (Madrau *et al.*, 2010). Neste estudo, os compostos fenólicos totais (CFT) variaram de 178,774 a 190,006 mg equivalente de ácido gálico/ 100 g de amostra, conforme pode ser visto na Tabela 4.13 para as diferentes temperaturas de ar de secagem aplicadas ao processo. Os resultados obtidos nesta pesquisa para os CFT foram particularmente interessantes, visto que a variação da temperatura não acarretou mudanças significativas nos valores encontrados.

Outro composto bioativo importante é o ácido ascórbico, visto que possui diversas funções fisiológicas como, por exemplo, assimilação do ferro e aminoácidos, manutenção de tecidos, além da síntese de proteínas e metabolismo de carboidratos (Güçlü *et al.*, 2005). Por

sofrer oxidação facilmente, durante o processo de secagem ocorre geralmente uma degradação dessa vitamina resultando em um material pós secagem com menor teor de ácido ascórbico do que o da amostra inicial. Os dados obtidos em diferentes condições do ar de secagem variaram no intervalo de 9,010 a 14,258 mg/100 g da amostra, sendo inferiores ao pó liofilizado (29,490 mg/100 g da amostra) e a polpa pura (32,703 mg/100 g da amostra) mostrando o efeito da temperatura no processo. Dentre as temperaturas aplicadas, o melhor resultado foi obtido a 60 °C, sendo menos prejudicial e proporcionando maior retenção do composto. Resultado semelhante também foi relatado por Piga *et al.* (2003) que observaram que a secagem de ameixas em uma cabine de fluxo de ar tangencial, a temperaturas de 60 e 85 °C, reduziu significativamente a quantidade de ácido ascórbico do produto final quando comparado às frutas frescas, no entanto entre as duas temperaturas aplicadas foi evidenciado que a menor condição de temperatura (60 °C) forneceu resultado mais favorável do que a 85 °C.

Com relação aos carotenoides, eles são bastante vulneráveis ao calor e em virtude disso ficam susceptíveis aos efeitos térmicos e reações oxidativas. Sua estrutura é composta por um sistema de ligações duplas conjugadas ao longo de uma cadeia polimérica aberta e especialmente sensível a exposição térmica prolongada (Ribeiro & Seravalli, 2007), o que explica a fragilidade desses compostos quando submetidos a um processo de secagem. Nesta pesquisa, o teor de carotenoides para a amostra liofilizada foi 729,370 µg/mL, já para os pós produzidos em temperaturas diferentes variou no intervalo de 108,993 a 132,736 µg/mL (Tabela 4.13). Quando se comparam os pós com a polpa pura (1469,814 µg/mL), a qual não foi submetida ao processo de secagem, fica evidente o impacto da temperatura e tempo de secagem nas amostras analisadas. Na pesquisa realizada por Sogi *et al.* (2015), efeito semelhante foi relatado ao estudar a desidratação de mangas em cubos obtidas em diferentes temperaturas do ar de secagem, sendo observado que temperaturas mais elevadas acarretavam a diminuição do teor de carotenoides das amostras.

Como os antioxidantes atuam nas diferentes fases da reação de oxidação (inicialização, propagação e terminação), diminuindo ou até prevenindo os danos oxidativos, neste estudo a etapa de inicialização foi avaliada a partir da atividade antioxidante total, já a etapa de propagação foi analisada a partir do resultado fornecido pela atividade quelante e, por fim, o efeito na terminação foi avaliado pelo sequestro dos radicais DPPH e ABTS.

Na Tabela 4.13 também são mostrados os valores obtidos para a atividade antioxidante total que variou no intervalo de 143,529 a 216,116 mg ácido ascórbico/g amostra. Os valores

mais elevados para a AAT foram encontrados para a amostra liofilizada e para a obtida a 50 °C (207,042 e 216,116 mg ácido. ascórbico/g amostra, respectivamente). O aumento da temperatura de 50 °C para 60 e 70 °C ocasionou a diminuição da AAT em 33,587 e 30,006 %, respectivamente, sem diferença significativa entre eles, mas apesar do incremento de 10 e 20 °C na temperatura do ar de secagem não ter se mostrado favorável, quando a temperatura de secagem foi elevada para 80 °C, a atividade antioxidante aumentou significativamente para 178,822 mg ácido ascórbico/g amostra, e a redução agora foi cerca de 17,257 %. Esse perfil favorável pode ser consequência da menor exposição da amostra ao oxigênio, uma vez que a elevação da temperatura do ar ocasionou o aumento da taxa de evaporação e consequente redução do tempo de secagem.

Tabela 4.13 - Compostos bioativos e atividades antioxidantes presentes nos pós de ameixa

	Compostos			Atividade		
	fenólicos totais (mg equivalente de ácido gálico/ 100 g da amostra)	Ácido ascórbico (mg/100 g da amostra)	Carotenoides (µg/mL)	antioxidante total (mg ácido ascórbico/g da amostra)	Inibição do DPPH (%)	TEAC ABTS (µmol Trolox/ g da amostra)
Polpa	257,137 ± 9,256 ^a	32,703 ± 0,218 ^a	1469,814 ± 11,921 ^a	150,203 ± 0,643 ^a	53,192 ± 2,952 ^a	8,435 ± 0,149 ^a
Liofilizada	221,820 ± 8,872 ^b	29,490 ± 0,309 ^b	729,370 ± 4,724 ^b	207,042 ± 0,755 ^b	41,824 ± 0,814 ^b	7,973 ± 0,003 ^b
50 °C	178,774 ± 4,035 ^c	13,094 ± 0,093 ^c	132,736 ± 1,863 ^c	216,116 ± 6,793 ^b	16,871 ± 0,099 ^c	5,771 ± 0,070 ^c
60 °C	179,247 ± 5,779 ^c	14,258 ± 0,165 ^d	122,394 ± 2,047 ^{cd}	143,529 ± 6,793 ^c	20,775 ± 1,781 ^c	6,351 ± 0,150 ^d
70 °C	186,579 ± 1,477 ^c	9,377 ± 0,129 ^e	111,398 ± 0,933 ^d	151,268 ± 3,397 ^c	18,453 ± 0,740 ^c	6,574 ± 0,211 ^d
80 °C	190,600 ± 5,133 ^c	9,010 ± 0,146 ^e	108,993 ± 1,249 ^d	179,822 ± 2,264 ^d	26,845 ± 1,878 ^d	6,277 ± 0,189 ^d

Nível de significância $p < 0,05$. Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre as amostras.

O comportamento observado para a atividade antioxidante total pode ser causado em virtude dos polifenóis em um estágio intermediário de oxidação apresentarem maior poder antioxidante do que no início, mesmo que seja apenas temporariamente; outro ponto é que procedimentos a alta temperatura podem levar à formação de novos compostos com maior atividade antioxidante (Madrau *et al.*, 2010). Isso é essencialmente o que acontece com as reações de escurecimento não enzimático, que criam vários produtos, com poder antioxidante consideravelmente mais alto, e esse poder é frequentemente exercido em um mecanismo do tipo quebra de cadeia (Elizalde *et al.* 1992; Manzocco *et al.* 2001; Morales & Jiménez -Pérez 2004; Tagliazucchi *et al.*, 2008; Madrau *et al.*, 2010). A etapa de propagação foi avaliada pelo teste de atividade quelante e nenhum dos pós analisados apresentou capacidade de quelação do ferro.

A capacidade antioxidante foi avaliada pelo método DPPH•, técnica bastante utilizada, que consiste na eliminação do radical livre estável 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH•). No entanto, a avaliação antioxidante não deve se basear apenas em uma única metodologia, sendo necessário outro método para caracterizar um composto como antioxidante e, em virtude disso, o método TEAC (*Trolox Equivalent Antioxidant Capacity*) ou sequestro do radical ABTS•⁺ (ácido 2,2'-azinobis-3-etilbenzotiazolína-6-sulfônico) também foi aplicado (Cieśła *et al.*, 2012). O princípio empregado pela maioria das metodologias consiste basicamente na geração de um radical sintético e, através de monitoramento por espectrofotômetro UV/visível, avaliar a capacidade da amostra para eliminar ou neutralizar o radical (Oliveira, 2015).

A capacidade antioxidante dos pós, medida pelos métodos DPPH• e ABTS•⁺ é mostrada na Tabela 4.13. Dentre as amostras obtidas a diferentes temperaturas do ar de secagem, observa-se que as temperaturas mais baixas levam à maior diminuição da capacidade antioxidante dos pós. Os valores para % inibição do DPPH para as temperaturas de 50 e 80 °C (16,871 e 26,845 %, respectivamente), mostram que a condição de temperatura mais elevada foi favorável ao processo, uma vez que houve menor degradação dos compostos inibidores do radical DPPH•. Para o TEAC ABTS, apenas a temperatura de 50 °C apresentou diferença significativa quando comparada às outras condições aplicadas, demonstrando que o range de temperatura de 60 a 80 °C não exerce efeito negativo para a variável analisada. A exposição prolongada ao oxigênio afetou os compostos capazes de eliminar o DPPH• e o ABTS•⁺; observa-se que a aplicação da temperatura mais alta (80 °C) resultou em um aumento visível nos valores do % inibição do

DPPH, uma vez que nessa temperatura a taxa de evaporação é mais elevada fazendo com que a secagem ocorra em menor tempo quando comparado às demais temperaturas avaliadas neste estudo.

Gil *et al.* (2002) relataram em seu estudo que em ameixas frescas a contribuição de compostos fenólicos para a capacidade antioxidante foi mais importante que o da vitamina C. Considerando os processos de secagem, Wojdyło *et al.* (2014) demonstraram que a capacidade antioxidante e o conteúdo de polifenóis das cerejas desidratadas em diferentes condições foram alterados da mesma maneira. Nesta pesquisa, observou-se que as alterações na capacidade antioxidante dos pós de ameixa não foram completamente seguidas pelas alterações nos compostos fenólicos, uma vez que a variação na temperatura de operação não teve efeito significativo sobre os compostos fenólicos, mas influenciou o % de inibição do DPPH e o TEAC ABTS (Tabela 4.13).

De acordo com Piga *et al.* (2003), a temperatura aplicada durante a secagem pode influenciar as propriedades antioxidantes, alterando a composição dos polifenóis, possível degradação dos compostos diminui a capacidade antioxidante, enquanto, por outro lado, um estágio intermediário de sua oxidação durante o tratamento térmico pode levar a um aumento na propriedades de eliminação de radicais livres (Cheigh *et al.*, 1995) e desencadeando a formação de produtos da reação de Maillard em estágio intermediário. Cheigh *et al.* (1995) concluíram que a capacidade antioxidante final de ameixas secas era dependente do cultivar utilizado e, portanto, estava relacionado à sua composição química inicial. Assim, a qualidade dos pós de ameixa em termos de propriedades antioxidantes deve levar em consideração um amplo espectro de reações químicas induzidas termicamente que ocorrem em virtude da degradação térmica e oxidativa dos compostos (Wojdyło *et al.*, 2014).

Dentre todas as análises realizadas, a maior diferença entre o processo em camada de espuma e a liofilização foi evidenciada para os compostos bioativos. A liofilização proporciona maior conservação destes compostos, visto que opera a baixa temperatura. Com relação à secagem em camada de espuma, os compostos fenólicos não foram impactados pelas condições de processo, a atividade antioxidante obteve seu melhor resultado para a temperatura de 50°C, sofrendo diminuição para 60 e 70°C e sendo favorecida pela temperatura mais elevada, o que não ocorreu com a quantidade de ácido ascórbico e carotenoides que foi bastante reduzida pela ação desta variável, em virtude de serem bastante sensíveis ao calor. Tendo em vista que o

processo de liofilização é oneroso e com base em todos os dados analisados, conclui-se que o processo em camada de espuma é uma alternativa viável e a condição que forneceu os melhores resultados tanto para o processo de secagem quanto para o pó foi a temperatura de 80 °C.

Capítulo 5

Conclusão

5 Conclusão

Neste trabalho, foram realizadas etapas de otimização com o intuito de analisar as melhores condições operacionais para a secagem da espuma de ameixa e proporcionar um pó com alta qualidade. Analisando as condições para a produção da espuma de ameixa foi evidenciado que variações na densidade da espuma provocam alterações em suas propriedades térmicas, fazendo com que estes parâmetros diminuam com o aumento da incorporação do ar. No entanto, apesar da diminuição da condutividade térmica, a espuma mais expandida favoreceu a diminuição do tempo de secagem, em virtude do aumento da área superficial do material. O valor da difusividade efetiva de transferência de massa estimado a partir do ajuste do modelo ficou compreendido entre $1,036.10^{-8}$ e $1,558.10^{-8}$ m²/s, cujo resultado foi muito satisfatório e mostra a eficiência do processo. Com relação aos efeitos do tempo de batimento e concentração de albumina de ovo, foi evidenciado que o tempo de batimento foi mais significativo e exerceu maior influência sobre as respostas analisadas do que a concentração de albumina. O teste F mostrou que os modelos estatísticos foram significativos, sendo preditivos para condutividade térmica e tempo de secagem. Após a aplicação dos dados obtidos na função conveniência, obteve-se que a concentração de albumina ideal, para as condições estudadas, é 3% e o tempo de batimento que fornece a melhor condição de processo é 12 minutos.

Com a definição dos parâmetros operacionais para a espuma de ameixa, o estudo seguinte objetivou a determinação das condições mais adequadas ao processo quanto à temperatura de operação e espessura da camada. Conforme foi evidenciado pelas curvas de secagem das espumas de ameixa, o processo ocorreu em um período de taxa decrescente, sugerindo que a difusão é o mecanismo que governa o movimento interno da umidade. A análise das curvas de secagem e dos números adimensionais mostraram que a secagem é controlada pelo mecanismo interno de transferência de massa, uma vez que a resistência externa ao transporte de massa é desprezível. O tempo de processo e as características do pó foram influenciados significativamente pela temperatura do ar de secagem e pela espessura da camada. Os resultados obtidos mostraram que o binômio temperatura mais alta e espessura mais baixa resulta em menores tempos de secagem e pós com menor umidade e atividade de água, características desejáveis ao produto final. Com a aplicação da função conveniência foi verificado que os melhores resultados foram alcançados quando a espessura foi 0,8 cm e a temperatura do ar 80 °C. Dentre os modelos matemáticos propostos, a Distribuição de Weibull foi o modelo que melhor descreveu a secagem, servindo como uma ferramenta útil para a otimização do processo.

Após a otimização dos parâmetros para a produção da espuma e as condições operacionais para a obtenção do pó de ameixa foram avaliados os efeitos da temperatura de secagem sobre as propriedades físico-químicas e compostos bioativos do pó de ameixa mediante comparação com o pó liofilizado. Os dados relativos a secagem mostraram que o processo ocorreu em taxa decrescente, observando-se o aumento da taxa de secagem conforme elevação da temperatura. Constatou-se que o processo conduzido a 80 °C foi bastante eficiente tanto para a secagem, uma vez que reduziu o tempo do processo para 55 minutos, quanto para o pó, visto que forneceu um produto com baixa coesão entre as partículas e boa fluidez, características importantes para materiais particulados. Nos resultados analisados, não foi observada influência significativa da temperatura sobre as concentrações de proteína, carboidratos, lipídeos, fibra bruta e cinzas. Contudo, a umidade teve o seu valor bastante afetado, obtendo-se o melhor resultado para 80 °C (1,755 g/100 g de pó seco). Todos os pós apresentaram boa solubilidade e baixa atividade de água, todavia elevada higroscopicidade.

A comparação entre o pó liofilizado e os pós obtidos por secagem em camada de espuma mostraram que a maior diferença entre esses dois processos foi evidenciada para os compostos bioativos, visto que a liofilização, por operar a baixa temperatura, contribui para uma maior conservação destes compostos. A secagem em camada de espuma mesmo sendo um processo rápido de secagem expõe o material a temperaturas bem mais altas, o que faz degradar os compostos termossensíveis. Com relação à secagem em camada de espuma, os compostos fenólicos não foram impactados pelas condições de processo, a atividade antioxidante obteve seu melhor resultado para a temperatura de 50°C, sofrendo diminuição nas temperaturas mais elevadas. A concentração de ácido ascórbico variou no intervalo de 9,010 a 14,258 mg/100 g da amostra, sendo inferior a do pó liofilizado (29,490 mg/100 g da amostra) e a da polpa pura (32,703 mg/100 g da amostra). Para as amostras pura e liofilizada, os valores obtidos para os carotenoides foram 1469,814 e 729,370 µg/mL, respectivamente, e para as diferentes temperaturas aplicadas (50, 60, 70 e 80 °C), a concentração variou no intervalo de 108,993 a 132,736 µg/mL. A redução considerável tanto do ácido ascórbico quanto dos carotenoides com a elevação da temperatura evidencia a alta sensibilidade desses compostos ao calor. Com base em todos os dados analisados e levando em consideração o tempo e o custo elevados do processo de liofilização, a secagem em camada de espuma torna-se uma alternativa viável e de baixo para a obtenção da ameixa em pó.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

ABLONE, R.; GASTON, A.; LARA, M. A. (2000). Determination of mass diffusivity coefficient. *Drying technology*, v. 19, p. 2273-2290. doi:10.1080/07373930008917842

AGOSTINI-COSTA, T. S.; WONDRACECK, D. C.; LOPES, R. M.; VIEIRA, R. F.; FERREIRA, F. R. (2010). Composição de carotenoides em Canistel. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 32, p. 903-906.

AKINTOYE, O. A.; OGUNTUNDE, A. O. (1991). Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soymilk. *Drying technology*, v. 9, p. 245-262. doi:10.1080/07373939108916651

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p. 99-104. doi:10.1016/S0260-8774(02)00425-9

ALMEIDA, M. A. *Transglutaminase e albumina de ovo em reestruturados cozidos de frango*. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP.

ANDERSON, L.; DIBBLE, M. V.; TURKKI, P. R.; MITCHELL, H. S. (1988). *Nutrição*. Rio de Janeiro: Guanabara.

ANVISA. Portaria nº 540, de 27 de outubro de 1997. *Aprova o Regulamento Técnico: Aditivos Alimentares - definições, classificação e emprego*. Ministério da Saúde - MS. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Anvisa. Disponível em <http://www.anvisa.gov.br>. Acesso em: 14 out. 2016.

AOAC, Association of official analytical chemistry. (1998). *Official methods of analysis of the Association of official analytical chemistry* (17th ed.). Washington: AOAC.

ARAÚJO, C. S.; MACEDO, L. L.; VIMERCATI, W. C.; SARAIVA, S. H.; OLIVEIRA, A. N.; TEIXEIRA, L. J. Q. (2017). Cinética de secagem de acerola em leite de espuma e ajuste de

modelos matemáticos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 20, 1. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.15216>

ARION, C. M.; TABART, J.; KEVERS, C.; NICULAUA, M.; FILIMON, R.; BECEANU, D.; DOMMES, J. (2014). Antioxidant potencial of different plum cultivars during storage. *Food Chemistry*, v. 146, p. 485-491. doi:10.1016/j.foodchem.2013.09.072

ARRANZ S, PÉREZ-JIMÉNEZ J, SAURA-CALIXTO F. (2008). Antioxidant capacity of walnut (*Juglans regia* L.): contribution of oil and defatted matter. *European Food Research and Technology*, v. 227, p. 425–431. doi: 10.1007/s00217-007-0737-2

ARUOMA, O. I. (1994). Free radicals and antioxidant strategies in sports. *The Journal of Nutritional Biochemistry*. v. 5, p. 370-381.

ATHUKORALA, Y.; KIM, K.; JEON, Y. (2006). Antiproliferative and antioxidant properties of an enzymatic hydrolysate from brown alga, *Ecklonia cava*. *Food and Chemical Toxicology*, v. 44, p. 1065-1074.

ATOUI, A. K.; MANSOURI, A.; BOSKOU, G.; KEFALAS, P. (2005). Tea and herbal infusions: Their antioxidant activity and phenolic profile. *Food Chemistry*. v. 89, n. 1, p. 27-36.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. (2016). Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, London, v. 91, n. 8, p. 76-87.

AW, T. Y.; WIERZICKA, G.; JONES, D. P. (1991). Oral glutathione increases tissue glutathione in vivo. *Chemico-Biological Interactions*. v.80, p. 89-97.

AZEVEDO, W. M.; OLIVEIRA, L. F. R.; ALCÂNTARA, M. A.; CORDEIRO, A. M. T. M.; DAMASCENO, K. S. F. S. C.; ARAÚJO, N. K.; ASSIS, C. F.; SOUSA JÚNIOR, F. C. (2020) Physicochemical characterization, fatty acid profile, antioxidant activity and antibacterial potential of cacay oil, coconut oil and cacay butter. *PLoS ONE*, v. 15(4): e0232224. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232224>

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. (2014). Optimization of foaming parameters and investigating the effects of drying temperature on the foam-mat drying of shrimp (*Penaeus indicus*). *Drying technology*, v. 32, p. 374-384. doi:10.1080/07373937.2013.794829

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; KHODAPARAST, M. H. (2016). Effects of foam-mat drying temperature on physico-chemical and microstructural properties of shrimp powder. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, pp. 122-126. doi:10.1016/j.ifset.2016.01.002

AZIZPOUR, M.; MOHEBBI, M.; HADDAD KHODAPARAST, M. H.; VARIDI, M. (2013). Foam-mat drying of shrimp: Characterization and drying kinetics of foam. *Agricultural Engineering International: the CIGR journal*, v. 15, p. 159–165.

BAG, S.; SRIVASTAV, P.; MISHRA, H. (2011). Optimization of process parameters for foaming of bael (*Aegle marmelos* L.) fruit pulp. *Food Bioprocess Technology*, v. 4, p. 1450-1458. doi:10.1007/s11947-009-0243-6

BALASUBRAMANIAN, S.; PARIDHI, G.; BOSCO, J.; KADAM, D. (2012). Optimization of process conditions for the development of tomato foam by Box-Behnken design. *Food and Nutrition Sciences*, v. 3, p. 925-930. doi:10.4236/fns.2012.37122

BANDEIRA, J. M. Compatibilidade reprodutiva e micropropagação de ameixeiras japonesas. 2010. 120 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas – RS.

BARTH, C.; MOEDER, W.; KLESSIG, D. F.; CONKLIN, P. L. (2004). The timing of senescence and response to pathogens is altered in the ascorbate-deficient Arabidopsis mutant vitamin vtc1. *Plant Physiology*, v. 134, p. 1784–1792.

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

BELITZ, H. D.; GROSCH, W.; SCHIEBERLE, P. (s.d.). *Food Chemistry* (4 ed.). Berlin.

BENSTAIN, C.; GARCIA, H.; VAZQUEZ, A. (1993). Foam-mat dehydration of Jamaica (*Hibiscus Sabdariffa* L.) instant drink. *Drying Technology*, v. 11, p. 221-228. doi:10.1080/07373939308916811

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Seventh ed.). Jefferson city: John Wiley and sons.

BERK, Z. (2009). *Food process engineering and technology*. New York: Academic Press e Elsevier.

BHANDARI, B.; HOWES, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, v. 40, p. 71-79. doi:10.1016/S0260-8774(99)00039-4

BHANDARI, B.; BANSAL, N.; ZHANG, M.; SCHUCK, P. (2013). *Handbook of food powders*. (B. B. Bhandari, Ed.) Woodhead Publishing Limited.

BHUTANI, V. P.; JOSHI, V. K. (1995). Plum. In: SALUNKHE, D. K.; KADAM, S. S. *Handbook of Fruit Science and Tecnology* (p. 203-242). New York: Marcel Dekker, Ed. Biophys Acta, 1502: 139–144.

BIAŁOBRZEWSKI, I. (2006). Simultaneous Heat and Mass Transfer in Shrinkable Apple Slab During Drying. *Drying Technology*, v. 24, p. 551–559. doi: 10.1080/07373930600626396

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. (2002). *Transport phenomena* (Second ed.). New York: Wiley.

BREDA, C. A.; SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; CORREIA, C. A. (2012). Shelf life of powdered *Campomanesia adamantium* pulp in controlled environments. *Food Chemistry*, v. 135, p. 2960-2964. doi:10.1016/j.foodchem.2012.07.02

BRENNAN J. G. (2006). *Food Processing Handbook*. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p. 85-95.

CANDIOTI, L. V.; ZAN, M. M.; CÁMARA, M. S.; GOICOCHEA, H. C. (2014). Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. *Talanta*, v. 124, p. 123–138.

CAI, Y. Z.; CORKE, H. (2000). Production and properties of spray dried *Amaranthus betacyanin* pigments. *Journal of Food Science*, v. 65, p. 1248-1252. doi:10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x

CALÇADA, L.A. *Modelagem e Simulação de Secadores de Leito Fixo*. 1994. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P.; RAMOS, A.; CAL-VIDAL, J. (2005). Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, v. 6, p. 420-428. doi:10.1016/j.ifset.2005.05.003

CAPARINO, O.; TANG, J.; NINDO, C.; SABLANI, S.; POWERS, J.; FELLMAN, J. (2012). Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao' Var.*) powder. *Journal of Food Engineering*, v. 111, p. 135-148. doi:10.1016/j.jfoodeng2012.01.010

CARR, R. (1965). Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineer*, v. 72, p. 163-168.

CASTRO, L. A. S.; NAKASU, B. H.; FORTES, J. F.; CANTILLANO, R. F. F.; FREIRE, C. J. S.; MEDEIROS, A. R. M.; RASEIRA, A.; FINARDI, N. L.; CAMELATTO, D. (1994). A cultura da ameixa. *Revista Plantar – Embrapa*. Serviço de Produção de Informação – SPI. Brasília.

CASTRO, L. A. S.; NAKASU, B. H.; PEREIRA, J. F. M. (2008). *Ameixeira: Histórico e Perspectivas de Cultivo*. Circular Técnica 70. Embrapa. ISSN 1981-5999, versão online. Pelotas - RS.

CEAGESP. Ameixa estrangeira. CEAGESP, 2019. Disponível em: <<http://www.ceagesp.gov.br/guia-ceagesp/ameixa-estrangeira/>>. Acesso em: 03 setembro 2020.

CECCHI, H. M. (2009). *Fundamentos teórico e práticos em análises de alimentos* (2ª ed.). Campinas: Editora Unicamp.

CELESTINO, S. M. C. *Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos concorrentes: secagem de sementes de soja*. 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.

CHÁVEZ, D.; ASCHERI, J.; CARVALHO, C.; GODOY, R.; PACHECO, S. (2017). Sorghum and roasted coffee blends as a novel extruded product: Bioactive compounds and antioxidant capacity. *Journal of Functional Foods*, v. 29, p. 93-103.

CHEGINI, G.; GHOBADIAN, B. (2005). Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. *Drying Technology*, v. 23, p. 657 - 668. doi:10.1081/DRT-200054161

CHEIGH, H. S.; UM, S. H.; LEE, C. Y. (1995). *Antioxidant characteristics of melanin-related products from enzymatic browning reaction of catechin in a model system*. ACS Symposium Series 600 (p. 200–208). Washington DC: American Chemic.

CHEN, Z.; GALLIE, D. R. (2004). The ascorbic acid redox state controls guard cell signaling and stomatal movement. *Plant Cell*, v. 16, p. 1143–1162.

CIEŚLA, Ł.; KRYSZEŃ, J.; STOCHMAL, A.; OLESZEK, W.; WAKSMUNDZKA-HAJNOS, M. (2012). Approach to develop a standardized TLC-DPPH test for assessing free radical scavenging properties of selected phenolic compounds. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, v. 70, p. 126-135. doi:10.1016/j.jpba.2012.06.007

COCCHI, P.; SILENZI, M.; CALABRI, G.; SALVI, G. (1980). Antidepressant effect of vitamin C. *Pediatrics*, v. 65, p. 862–863.

CONKLIN, P. L. (2001). Recent advances in the role and biosynthesis of ascorbic acid in plants. *Plant, Cell & Environment*, v. 24, p. 383–394.

CORAZZA, F. C.; NEITZEL, I.; SILVA, E. A. (2003). Modelagem de secador do tipo esteira: uma aplicação industrial. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, v. 25, n. 2, p. 133-140.

CRANK, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Oxford: Clarendon Press.

CREMASCO, M. A. (2008). *Fundamentos de transferência de massa*. Campinas, São Paulo: Editora da Unicamp.

CRUZ, W.F. *Obtenção de polpa de goiaba (Psidium guajava L.) em pó pelo método de secagem em cama de espuma*. 2013. Dissertação (Mestrado). Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K.; FENNEMA, O. (2010). *Química dos alimentos de Fennema*. Artmed.

DANCEY, C.; REIDY, J. (2006), *Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows*. Porto Alegre, Artmed.

DANTAS, J.; PONTES, C.; LEITE, G.; FERNANDES, P.; FREITAS, W.; CARVALHO, C. (2012). Biossíntese de vitaminas em frutos e hortaliças. *ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido*, v. 8, p. 22-37.

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

DAS, B.; AHMED, N.; SINGH, P. (2011). Prunus diversity – early and present development: A review. I. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, v. 14, p. 721–734.

DEHGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. (2018a). Heat and mass transfer modeling during foam-mat drying of lime juice as affected by different ovalbumin concentrations. *Journal of Food Engineering*, v. 238, p. 164-177. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.06.014

DEHGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. (2018b). Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: experimental and numerical investigation. *Powder technology*, v. 328, p. 470-484. doi:10.1016/j.powtec.2018.01.034

DEHGHANNYA, J.; POURAHMADA, M.; GHANBARZADEHA, B.; GHAFFARIB, H. (2019). A multivariable approach for intensification of foam-mat drying process: Empirical and three-dimensional numerical analyses. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, v. 135, p. 22-41. doi:10.1016/j.cep.2018.11.010

DEL CARO, A.; PIGA, A.; PINNA, I.; FENU, P. M.; AGABBIO, M. (2004). Effect of drying conditions and storage period on polyphenolic content, antioxidant capacity, and ascorbic acid of prunes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 52, p. 4780-4784. doi:10.1021/jf049889j

DEVRIES, A. (1958). Foam stability: A fundamental investigation of the factors controlling the stability of foam. *Rubber Chemistry and Technology*, v. 31, p. 1142-1205. doi:10.5254/1.3542363

DI MATTEO, V.; ESPOSITO, E. (2003). Biochemical and therapeutic effects of antioxidants in the treatment of Alzheimer's disease, Parkinson's disease, and amyotrophic lateral sclerosis. *Current Drug Targets. CNS Neurological Disorders*. v. 2, p. 95–107.

DIAS, C. A. R.; MOURA, P. M. S. S.; D'ANGELIZ, C. E. M. (2010). A complexa interação entre radicais livres, suplementação e doenças. *Revista Brasileira Multidisciplinar*, v.10, p. 34-43.

DICKINSON, E. (1998). Proteins at interfaces and emulsions stability, rheology and interactions. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, v. 94, p. 1657-1669. doi:10.1039/A801167B

DJAENI, M.; PRASETYANINGRUM, A.; SASONGKO, S.; WIDAYAT, W.; HII, C. (2013). Application of foam-mat drying with egg white for carrageenan: drying rate and product quality aspects. *Journal of Food Science and Technology*, v. 52. doi:10.1007/s13197-013-1081-0

DOMIN, M.; DZIKI, D.; KLAPSIA, S.; BLICHARZ-KANIA, A.; BIERNACKA, B.; KRZYKOWSKI, A. (2020). Influence of the freeze-drying conditions on the physicochemical properties and grinding characteristics of kiwi. *International Journal of Food Engineering*. doi: 10.1515/ijfe-2018-0315

DOYMAZ, I. (2006). Thin-layer drying behavior of mint leaves. *Journal of Food Engineering*, v. 74, p. 370-375. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.03.009

DOYMAZ, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 243-248. doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049

DUBEY, R. K.; SINGH, V.; UPADHYAY, G.; PANDEY, A. K.; PRAKASH, D. (2015). Assessment of Phytochemical composition and antioxidant potential in some indigenous chilli genotypes from North East India. *Food Chemistry*, v. 188, p. 119–125. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.04.088

EIDAM, T.; PAVANELLO, A. P.; AYUB, R. A. (2012). Ameixeira no Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*. v. 34, p. 001-319.

ELIZALDE, B. E.; BRESSA, F.; DALLA ROSA, M. (1992). Antioxidative action of Maillard reaction volatiles: Influence of Maillard solution browning level. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 69, p. 331–334.

ERTEKINA, C.; GOZLEKCIB, S.; KABASA, O.; SONMEZC, S.; AKINCI, I. (2006). Some physical, pomological and nutritional properties of two plum (*Prunus domestica* L.) cultivars. *Journal of Food Engineering*, v. 75, n, 4, p. 508-514.

EVELO, C. T. A.; PALMEN, N. G. M.; ARTUR, Y.; JANSSEN, G. M. E. (1992). Changes in blood glutathione concentrations and in erythrocyte glutathione reductase and glutathione transferase activity after running training and after participation in contests. *European Journal Applied Physiology*, v. 64, p. 354-358.

FALADE, K. O.; OKOCHA, J. O. (2010). Foam-Mat Drying of Plantain and Cooking Banana (*Musa spp.*). *Food Bioprocess Technology*, v. 5, p. 1173–1180.

FALADE, K.; ADEYANJU, K.; UZO-PETERS, P. (2003). Foam-mat drying of cowpea (*Vigna unguiculata*) using glyceryl monostearate and egg albumin as foaming agents. *European Food Research and Technology*, v. 217, p. 486-491. doi:10.1007/s00217-003-0775-3

FAZAEI, M.; EMAM-DJOMEH, Z.; ASHTARI, A. K.; OMID, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, v. 90, p. 667-675. doi:10.1016/j.fbp.2012.04.006

FELLOWS, P. (2000). *Food processing technology - Principles and practice* (2^a ed.). Cambridge: CRC Press LLC.

FELLOWS, P. J. (2006). *Tecnologia do processamento de alimentos*. Editora Artmed.

FENNEMA, O. R. (2000). *Química de los alimentos*. Zaragoza: Acribia, 1280 p.

FERNANDES, R.; QUEIROZ, F.; BOTREL, D.; ROCHA, V.; LIMA, C.; SOUZA, V. (2013). Foam mat drying of tomato pulp. *Bioscience Journal*, v. 29, p. 816–825.

FERREIRA, A. L. A.; MATSUBARA, L. S. (1997). Radicais livres: conceitos, doenças relacionadas, sistema de defesa e estresse oxidativo. *RAMB*, v. 43(1), p. 61-68.

FERREIRA, R. M. A.; FERNANDES, P. L. O.; FONTES, L. O.; RODRIGUES, A. P. M. S.; SILVA, L.T. (2010). Antioxidantes e sua importância na alimentação. *Revolução Verde*; v. 5, p 26-30.

FIEDOR, J.; BURDA, K. (2014). Potential Role of Carotenoids as Antioxidants in Human Health and Disease. *Nutrients*, v. 6, p. 466–488.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. (2009). Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Revista política hoje*, v. 18, p. 115-146.

FOEGEDING, E. A.; LUCK, P.; DAVIS, J. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, v. 20, p. 284-292. doi:10.1016/j.foodhyd.2005.03.014

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. (1980). *Princípios das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro: LTC. 2ª ed.

FRANCIS, F. J. (2000). *Encyclopedia of Food Science and Technology*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. v. 1. 2907 p.

FRANCO, T. S. *Desidratação de suco de Yacon pelo método de camada de espuma*. 2015. 191 f. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR.

FRANCO, T. S.; PERUSSELLO, C. A.; ELLENDERSEN, L. N.; MASSON, M. L. (2016). Effects of foam mat drying on physicochemical and microstructural properties of yacon juice powder. *LWT - Food Science and Technology*, v. 66, p. 503-513. doi:10.1016/j.lwt.2015.11.009

FRANCO, T.; ELLENDERSEN, L.; FATTORI, D.; GRANATO, D.; MASSON, M. (2015). Influence of the Addition of Ovalbumin and Emulsifier on the Physical Properties and Stability of Yacon (*Smallanthus sonchifolius*) Juice Foams Prepared for Foam Mat Drying Process. *Food and Bioprocess Technology*, v. 8, p. 2012-2026. doi:10.1007/s11947-015-1553-5

FRANCO, T.; PERUSSELLO, C.; ELLENDERSEN, L.; MASSON, M. (2017). Effect of process parameters on foam mat drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and thin-layer drying modelling of experimental data. *Journal of Food Process Engineering*, v. 40, p. 1-10. doi:10.1111/jfpe.12264

FRANCO, T.; PERUSSELLO, C.; ELLENDERSEN, L.; MASSON, M. (2017). Effect of process parameters on foam mat drying kinetics of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) and thin-layer drying modelling of experimental data. *Journal of Food Process Engineering*, v. 40, p. 1-10. doi:10.1111/jfpe.12264

GALINARI, E.; ALMEIDA-LIMA, J. M.; MANTOVANI, H.; ROCHA, H. (2018). Antioxidant, antiproliferative, and immunostimulatory effects of cell wall α -d-mannan fractions from *Kluyveromyces marxianus*. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 109, p. 837-846.

GAMA, J. J. T.; SYLOS, C. M. (2007). Effect of thermal pasteurization and concentration on carotenoid composition of Brazilian Valencia orange juice. *Food Chemistry*, v. 100, p.1686-1690.

GARCIA-ALONSO, M.; DE PASCUAL-TERESA, S.; SANTOS-BUELGA, C.; RIVAS-GONZALO, J. C. (2004). Evaluation of the antioxidant properties of fruits. *Food Chemistry*, v. 84, p. 8-13.

GARDNER, P. T.; WHITE, T. A. C.; MCPHAIL, D. B.; DUTHIE, G. G. (2000). The relative contributions of vitamin C, carotenoids and phenolics to the antioxidant potential of fruit juices. *Food Chemistry*, v. 68, p. 471-474.

GASTON, A. L.; ABLONE, R. M.; GINER, S. A.; BRUCE, D. M. (2004). Effect of modelling assumptions on the effective water diffusivity in wheat. *Biosystems engineering*, v. 88, p. 175-185. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.02.009

GAUTAM, M.; AGRAWAL, M.; GAUTAM, M.; SHARMA, P.; GAUTAM, A.; GAUTAM, S. (2012). Role of antioxidants in generalized anxiety disorder and depression. *Indian Journal Psychiatry*, v. 54, p. 244–247.

GEA NIRO RESEARCH LABORATORY, G. (04 de dez de 2017). GEA Niro Analytical Methods. Fonte: <http://www.niro.com/methods>

GELDART, D.; ABDULLAH, E.; VERLINDEN, A. (2009). Characterization of dry powders. *Powder Technology*, v. 160, p. 70-74. doi:10.1016/j.powtec.2008.04.089

GIL, M. I.; TOMÁS-BARBERÁN, F. A.; HESS-PIERCE, B.; KADER, A. A. (2002). Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C content of nectarine, peach, and plum cultivars from California. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 50, p. 4976-4982.

GOULA, A.; ADAMOPOULOS, K. (2008). Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I. Drying kinetics and product recovery. *Drying Technology*, v. 26, p. 714-725. doi:10.1080/07373930802046369

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

GÜÇLÜ, K.; SÖZGEN, K.; TÜTEM, E.; ÖZYÜREK, M.; APAK, R. (2005). Spectrophotometric determination of ascorbic acid using copper (II) - neocuproine reagent in beverages and pharmaceuticals. *Talanta*, v. 65, p. 1226-1232.

GURGEL, C. E. M. R. *Produção de pó de banana verde e madura através da secagem em camada de espuma – otimização das condições de processo e avaliação do produto*. 2020. 120 f. Tese (doutorado) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia química, Programa de pós-graduação em Engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN.

GURGEL, C. E. M. R. *Secagem da polpa de graviola (Annona muricata L.) em camada de espuma - desempenho do processo e características do produto*. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química. Centro de Tecnologia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN.

GURJÃO, K. C. V. *Desenvolvimento, armazenamento e secagem de Tamarindo (Tamarindus indica L.)*. 2006. 165 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba. Areia – PB.

HART, M. R.; GRAHAM, R. P.; GINETTE, L. F.; MORGAN JR., A. I. (1963). Foams for foam-mat drying. *Food Technology*, v. 17, n. 10, p. 90–92.

HAUSNER, H. (1967). Friction conditions in a mass of metal powder. *International journal of powder metallurgy*, v. 3, p. 7-13.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agriculture Research Engineering*, v. 6, p. 169-174.

HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. (2003). Rehydration of food powders. *Food Science & Technology Internship*, v. 9, p. 223-235. doi:10.1177/1082013203034938

HOLMAN, J. (1996). *Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill.

HUCK, C. W.; POPP, M.; SCHERZ, H.; BONN, G. K. (2000). Development and Evaluation of a New Method for the Determination of the Carotenoid Content in Selected Vegetables by HPLC and HPLC–MS–MS. *Journal of Chromatographic Science*, v. 38, p. 441 – 449.

IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; MARTÍNEZ, G.; LÓPEZ, A.; VÍRSEDA, P. (2003). Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p.151-160.

INCROPERA, F., & DEWITT, D. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (3 ed.). New York: Wiley & Sons.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. (14 de 10 de 2008). Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz. Fonte: <<http://www.ial.sp.gov.br/index.html>>

IOANNOU, I.; GUIGA, W.; CHARBONNEL, C.; GHOUL, M. (2011). Frozen Mirabelle plum drying: kinetics, modelling and impact on biochemical properties. *Food and bioproducts processing*, v. 89, p. 438-448. doi: 10.1016/j.fbp.2010.07.001

ISLAM, R.; MUJUMDAR, A.S. (2003). Simulation of liquid diffusion-controlled drying of shrinking thin slabs subjected to multiple heat sources. *Drying Technology*, v. 21, p. 413–438.

JACKSON, H.; BRAUN, C. L.; ERNST, H. (2008). The Chemistry of Novel Xanthophyll Carotenoids. *The American Journal of Cardiology*, v. 101, p. 50D- 57D.

JANGAM, S. V., LAW, C. L., & MUJUMDAR, A. S. (2010). *Drying of foods, vegetables and fruits* (Vol. 1). Singapore.

JAYA, S.; DAS, H. (2004). Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, v. 63, p. 125-134. doi:10.1016/S0260-8774(03)00135-3

JIANG, H.; ADHIKARI, B. (2013). *Fruit and vegetable powders*. Em B. Bhandari, M. Zhang, & P. Schuck, Handbook of food powders (p. 532-552). Woodhead publishing Limited.

JINAPONG, N.; SUPHANTHARIKA, M.; JAMNONG, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bedglomeration. *Journal of Food Engineering*, v. 84, p. 194-205. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032

JITTANIT, W.; CHANTARA-IN, M. D.; RATANAVONG, W. (2011). Production of tamarind powder by drum dryer using maltodextrin and Arabic gum as adjuncts. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, v. 33, p. 33-41.

JOHNSTON, C. S.; BOWLING, D. L. J. (2002). Stability of ascorbic acid in commercially available orange juices. *Journal of the American Dietetic Association*, v. 102, p. 525-529.

KADAM, D. M.; BALASUBRAMANIAN, S. (2011). Foam mat drying of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 35, p. 488-495. doi:10.1111/j.1745-4549.2010.00492.x

KALIORA, A.; DEDOUSSI, G.; SCHMIDT, H. (2006). Dietary antioxidants in preventing atherogenesis. *Atherosclerosis*, v. 187, p. 1-17.

KAMAL, M.; ALI, R.; RAHMAN, M.; SHISHIR, M. R. I.; YASMIN, S.; SARKER, S. H. (2019). Effects of processing techniques on drying characteristics, physicochemical properties and functional compounds of green and red chilli (*Capsicum annum* L.) powder. *Journal of Food Science Technology*, v. 56, p. 3185–3194. doi: 10.1007/s13197-019-03733-6

KAMEL, B.S. (1997). *Emulsifiers*. Food additive user's handbook. MITH, J. London: Blackie, p. 169-201.

KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S.; MALADHI, D. (2014). Optimization of process parameters for foam-mat drying of papaya pulp. *Journal of Food Science Technology*, v. 51, p. 2526-2534. doi:10.1007/s13197-012-0812-y

KARATHANOS, V.; BELESSIOTIS, V. (1999). Application of thin-layer drying equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 74, p. 355–361. doi:10.1006/jaer.1999.0473

KARIM, A.; WAI, C. (1999). Characteristics of foam prepared from starfruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methylcellulose. *Food hydrocolloids*, v. 13, p. 203-210. doi:10.1016/S0268-005X(98)00086-1

KEEY, R. B. (1992). *Drying of loose and particule materials*. New York: Hemisphere publishing corporation, 537 p.

KOWALSKI, S. J.; MIERZWA, D. (2011). Drying of osmotically dehydrated biological materials. *Journal of Agricultural Machinery Science*, v. 7, p. 325-331.

KOURY, J. C.; DONANGELO, C. M. (2003). Zinco, estresse oxidativo e atividade física. *Revista de Nutrição*, v. 16 (4), p. 433-441. doi: 10.1590/S1415-52732003000400007.

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

KREITH, F.; BOHN, M. S. (2001). *Princípios de Transferência de Calor*. São Paulo: Edgard Blücher.

KUMAR, C.; MILLAR, G. J.; KARIM, M. A. (2014). Effective Diffusivity and Evaporative Cooling in Convective Drying of Food Material. *Drying technology*, v. 33, p. 227-237. doi:10.1080/07373937.2014.947512

KUMAR, P.; SAGAR, V. (2014). Drying kinetics and physicochemical characteristics of osmo-dehydrated mango, guava and aonla under different drying conditions. *Journal of Food Science and Technology*, v. 51, p. 1540–1546. doi:10.1007/s13197-012-0658-3

KUMARAN, A.; KARUNAKARAN, R. (2007). In vitro antioxidant activities of methanol extracts of five *Phyllanthus* species from India. *LWT - Food Science and Technology*, v. 40, p. 344-352.

LEONTOWICZ, H.; LEONTOWICZ, M.; LATOCHA, P.; JESION, I.; PARK, Y. S.; KATRICH, E.; BARASCH, D.; NEMIROVSKI, A.; GORINSTEIN, S. (2016). Bioactivity and nutritional properties of hardy kiwi fruit *Actinidia argute* in comparison with *Actinidia deliciosa* ‘Hayward’ and *Actinidia eriantha* ‘Bidan’. *Food Chemistry*, v. 196, p. 281-291.

LEWICKI, P. (2006). Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science and Technology*, v. 17, p. 153–163. doi:10.1016/j.tifs.2005.10.012

LICHTENTHALER, H.; BUSCHMANN, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, v. 8, p. F4.3.1-F4.3.

LIM, L.; TANG, J.; HE, J. (1995). Moisture sorption characteristics of freeze dried blueberries. *International Journal of Food Science*, v. 60, p. 810–814.

LIMA, O. A. *Estudo da Secagem do Polihidroxibutirato em Leite Fluidizado*. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

LIOCHEV, S. I. (2013). Reactive oxygen species and the free radicals theory of aging. *Free Radical Biology and Medicine*, v. 60, p 1-4.

LISBÔA, C.; FIGUEIRÊDO, R.; QUEIROZ, A. (2012). Armazenamento de figo-da-índia em pó. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 216-221.

LIU, Y.; WANG, P.; CHEN, F.; YUAN, Y.; ZHU, Y.; YAN, H.; HU, X. (2015). Role of plant polyphenols in acrylamide formation and elimination. *Food chemistry*, v. 186, p. 46-53.

LOMAKINA, K.; MÍKOVÁ, K. (2006). Study of the factors affecting the foaming properties of egg white - a review. *Czech Journal of Food Science*, v. 24, p. 110-118. doi:10.17221/3305-CJFS

LUIKOV, A. V. (1975). Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. *International Journal Heat and Mass Transfer*, v. 18, p. 1-14.

MADAMBA, P. S. (2003). Thin layer drying models for osmotically pre-dried young coconut. *Drying Technology*, v. 21, n. 9, p. 1759 – 1780.

MADRAU, M. A.; SANGUINETTI, A. M.; DEL CARO, A.; FADDA, C.; PIGA, A. (2010). Contribution of melanoidins to the antioxidant activity of prunes. *Journal of Food Quality*, v. 33, p. 155-170. doi:10.1111/j.1745-4557.2010.00328.x

MANCINI, M. C. *Transferência de Massa em Secadores de Grãos*. 1996. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ.

MANGINO, M. E. (1992) Gelation of whey protein concentrates. *Food Technology Journal*. v. 46, n. 1, p. 114-117.

MANUAL (2012). Manual de instruções. Liofilizadores L101. Liobras.

MANZOCCO, L.; CALLIGARIS, S.; MASTROCOLA, D.; NICOLI, M. C.; LERICI, C. R. (2001). Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends in Food Science and Technology*, v. 11, p. 340-346.

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

MARQUES, G. M. R. *Secagem do caldo de cana em leito de espuma e análise sensorial do produto*. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Itapetinga – BA.

MARQUES, L.G. *Liofilização de frutas tropicais*. 2008. 255f. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP.

MARTÍNEZ-PADILLA, L. P.; GARCÍA-MENA, V.; CASAS-ALENCÁSTER, N. B.; SOSA-HERRERA, M. G. (2014). Foaming properties of skim milk powder fortified with milk proteins. *International Dairy Journal*, v. 36, p. 21–28.

MARTINS, N.; PETROPOULOS, S.; FERREIRA, I. C. (2016). Chemical composition and bioactive compounds of garlic (*Allium sativum* L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: a review. *Food chemistry*, v. 211, p. 41-50.

MASSARINI, G.; SILVA TELLES, A. *Aspectos da secagem de Material Sólido Particulado*. In: Freire, J. T.; Sartori, D. J. M. (1992). Tópicos especiais em Secagem – Vol. 1, DEQ/UFSCar, São Carlos/SP, p. 1-39.

MATSUMURA, Y.; MORI, T. Gelation. In: HALL, G.M. (1996). *Methods of testing protein functionally*. London: Chapman e Hall. p. 76-109.

MAYTA, M. S. A. *Estudo de Coeficiente de Transferência de Massa na Secagem de Grãos em Leito Deslizante e Fluxos Cruzados*. 1994. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

MCMINN, W. (2006). Thin-layer modeling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering*, v. 72, p. 113-123. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.11.025

MCMINN, W.; MAGEE, T. (1999). Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. *Food and Bioproducts Processing*, v. 77, p. 175-193. doi:10.1205/096030899532466

MELONI, P. L. S. (2003). *Desidratação de frutas e hortaliças*. Instituto Frutal – Fortaleza. 87 p.

MEREDITH, M.; MAY, J. (2013). Regulation of embryonic neurotransmitter and tyrosine hydroxylase protein levels by ascorbic acid. *Brain Research*, v. 1539, p. 7-14.

MICHALSKA, A.; WOJDYLO, A.; LECH, K.; LYSIAK, G.; FIGIEL, A. (2016). Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies. *Food chemistry*, v. 207, p. 223-232. doi:10.1016/j.foodchem.2016.03.075

MICHALSKA, A.; WOJDYŁO, A.; BRZEZOWSKA, J.; MAJERSKA, J.; CISKA, E. (2019). The Influence of Inulin on the Retention of Polyphenolic Compounds during the Drying of Blackcurrant Juice. *Molecules*, v. 24, 4167, p 1 – 19. doi:10.3390/molecules24224167

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, v. 20, p. 1503-1513. doi:10.1081/DRT-120005864

MIHOUBI, D.; ZAGROUBA, F.; VAXELAIRE, J.; BELLAGI, A.; ROQUES, M. (2004). Transfer phenomena during the drying of a shrinkable product: modeling and simulation. *Drying Technology*, v. 22 (1&2), p. 91–109.

MILALA, J.; KOSMALA, M.; SÓJKA, M.; KOŁODZIEJCZYK, K.; ZBRZEZNIAK, M.; MARKOWSKI, J. (2013). Plum pomaces as a potential source of dietary fibre: composition and antioxidant properties. *Journal of Food Science and Technology*, v. 50, p. 1012-1017. doi: 10.1007/s13197-011-0601-z

MILETIĆ, N.; MITROVIĆ, O.; POPOVIĆ, B.; NEDOVIĆ, V.; ZLATKOVIĆ, B.; KANDIĆ, M. (2013). Polyphenolic content and antioxidant capacity in fruits of plum (*Prunus domestica*

L.) cultivars “Valjevka” and “Mildora” as influenced by air drying. *Journal of Food Quality*, v. 36, p. 229-237. doi: 10.1111/jfq.12035

MISHRA, H. N.; JACOB, J. K.; SRINIVASAN, N. (2002). Preparation of apple powder and evaluation of its shelf life. *Bever food world*, v. 29, p. 49-52.

MISRA, M. K.; SARWAT, M.; BHAKUNI, P.; TUTEJA, R.; TUTEJA N. (2009). Oxidative stress and ischemic myocardial syndromes. *Medical Science Monitor*. v. 15, p. 209-219.

MORAES, F. P. *Polpa desidratada de caju amarelo (Anacardium occidentale L.) por atomização em spray dryer: caracterização físico-química, bioativa e estudo da vida de prateleira do produto*. 2014. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em engenharia química, Natal - RN.

MORALES, F. J.; JIMÉNEZ-PÉREZ, S. (2004). Peroxyl radical scavenging activity of melanoidins in aqueous systems. *European Food Research and Technology*, v. 218, p. 515–520.

MORETTI, M.; BUDNI, J.; DOS SANTOS, D.B.; ANTUNES, A.; DAUFENBACH, J.F.; MANOSSO, L.M.; FARINA, M.; RODRIGUES, A.L.S. (2013). Protective effects of ascorbic acid on behavior and oxidative status of restraint-stressed mice. *Journal of Molecular Neuroscience*, v. 49, p. 68-79.

MOURA, L. M. *Compostos bioativos em frutas cítricas: quantificação, avaliação da atividade antioxidante, parâmetros de cor e efeito da pasteurização*. 2011. 142 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Programa de Pós Graduação em Alimentos e Nutrição. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Araraquara - SP.

MUKHERJEE, D.; PURI, V.M.; ANANTHESWARAN, R.C. (1997). Measurement of coupled heat and moisture transfer coefficients for selected vegetables. *Drying Technology*, v. 15 (1), p. 71–94.

MULLER-MOULE, P.; GOLAN, T.; NIYOGI, K. K. (2004). Ascorbate deficient mutants of *Arabidopsis* grow in high light despite chronic photooxidative stress. *Plant Physiology*, v. 134, p. 1163–1172.

MUÑOZ-LÓPES, C.; URREA-GARCIA, G. R.; JIMÉNEZ, G. C.; LUNA-SOLANO, G. (2018). Effect of drying methods on the physicochemical and thermal properties of Mexican plum (*Spondias purpurea* L.). *CYTA - Journal of Food*, v. 16, p. 127-134. doi:10.1080/19476337.2017.1345984

MUTHUKUMARAN, A.; RATTI, C.; RAGHAVAN, V. (2008). Foam-mat freeze drying of egg white - Mathematical modeling Part II: Freeze drying and modeling. *Drying Technology*, v. 26, p. 513-518. doi:10.1080/07373930801929615

NAGAOKA, S.; KAKIUCHI, T.; OHARA, K.; MUKAI, K. (2007). Kinetics of the reaction by vitamin E is regenerated which natural by vitamin C. *Chemistry Physics of Lipids*, v. 146, p. 26–32.

NG, M.; SULAIMAN, R. (2018). Development of beetroot (*Beta vulgaris*) powder using foam mat drying. *LWT - Food Science and Technology*, v. 88, p. 80-86. doi:10.1016/j.lwt.2017.08.032

NISSEN, S. E.; TUZCU, E.; SCHOENHAGEN, P. (2005). Statin therapy, LDL cholesterol, C-reactive protein, and coronary artery disease. *New England Journal of Medicine*, v. 352, p. 29–38.

NISTOR, O.-V.; SEREMET, L.; ANDRONOIU, D.; RUDI, L. (2017). Influence of different drying methods on the physicochemical properties of red beetroot (*Beta vulgaris* L. var. *Cylindra*). *Food chemistry*, v. 236, p. 59-67. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.129

NÓBREGA, E.; OLIVEIRA, E.; GENOVESE, M.; CORREIA, R. (2015). The impact of hot air drying on the physical-chemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malphigia emarginata*) residue. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, p. 131-141.

NUNES, C. S. C. *Efeito do processamento nas características físico-químicas na Ameixa D'elvas: alterações ao nível dos polissacarídeos das paredes celulares, enzimas, aroma e textura*. 2008. 217 f. Dissertação (Doutorado em bioquímica). Departamento de Química. Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal.

O'CALLAGHAN, J.; MENZIES, D. J.; BAILEY, P. H. (1971). Digital simulation of agricultural drier performance. *Journal of agricultural engineering research*, v. 16, p. 223-244. doi:10.1016/S0021-8634(71)80016-1

OGUNTUNDE, A. O.; ADEOJO, M. O. (1993). Effect of foam stabilizing agents on density, stability and bubble size index of soymilk foams. *Nigerian Food Journal*, v. 11, p. 109-117.

OLIVEIRA, D. M.; CLEMENTE, E.; COSTA, J. M. (2014). Hygroscopic behavior and degree of caking of grugru palm (*Acrocomia aculeate*) powder. *Journal of Food Science and Technology*, v. 51, p. 2783-2789. doi:10.1007/s13197-012-0814-9

OLIVEIRA, G. L. (2015). Determinação da capacidade antioxidante de produtos naturais in vitro pelo método do DPPH•: estudo de revisão. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 17, p. 36-44. doi:10.1590/1983-084X/12_165

OLIVEIRA, R.; GODOY, H.; PRADO, M. (2010). Otimização de metodologia colorimétrica para a determinação de ácido ascórbico em geleias de frutas. *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, v. 30, p. 244-249.

OLSON, J.; KRINSKY, N. (1995). Introduction: the colorful fascinating world of the carotenoids: important physiologic modulators. *FASEB Journal*, v. 9, p. 1547–1550.

ÖZDEMİR, M.; DEVRES, Y. O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*. v. 42, n. 4, p. 225 – 233.

PAGE, G. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. MSc Thesis. Purdue University, Indiana, USA.

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

PASTORI, G. M.; KIDDLE, G.; ANTONIW, J.; BERNARD, S.; VELJOVIC-JOVANOVIC, S.; VERRIER, P. J.; NOCTOR, G.; FOYER, C. H. (2003). Leaf vitamin C contents modulate plant defense transcripts and regulate genes that control development through hormone signaling. *Plant Cell*, v. 15, p. 939-951.

PAVANELLI, A. P. (1998). *Aditivos para panificação: confeitos e funcionalidade*. Associação Brasileira da Indústria de Aditivos e Melhoradores para Alimentos e Bebidas. São Paulo.

PEREIRA, B. (1994). Exercício físico como pró-oxidante. *Revista Paulista de Educação Física*. v.8, p. 77-89.

PERNICE, R.; BORRIELLO, G.; FERRACANE, R.; BORRELLI, R. C.; CENNAMO, F.; RITIENI, A. (2009). Bergamot: A source of natural antioxidants for functionalized fruit juices. *Food Chemistry*. v. 112, n. 3, p. 545–550.

PIGA, A.; DEL CARO, A.; CORDA, G. (2003). From plums to prunes: Influence of drying parameters on polyphenols and antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, p. 3675–3681.

PIGNOCCHI, C.; FOYER, C. H. (2003). Apoplastic ascorbate metabolism and its role in the regulation of cell signalling. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 6, p. 379–389.

PRADO, A. *Composição fenólica e atividade antioxidante de frutas tropicais*. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba - SP.

RAHARITSIFA, N.; GENOVESE, D. B.; RATTI, C. (2006). Characterization of apple juice foams for foam mat drying prepared with egg white protein and methylcellulose. *Journal of food science*, v. 71, p. 142-151. doi:10.1111/j.1365-2621.2006.tb15627.x

RAHMAN, M. S.; PERERA, C. O. (2007). *Drying and food preservation*. In M. S. RAHMAN (Ed.), *Handbook of food preservation*. New York: Marcel Dekker. p. 403–432.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R. (2006). Optimizing the process parameters for foam mat drying of Totapuri mango pulp. *Madras Agricultural Journal*, v. 93, p. 86–98.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. (2007). Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 79, p. 1452-1459. doi:10.1016/j.foodeng.2006.04.027

RAMOS, P. S. R. *Influência de emulsificantes e da enzima transglutaminase no desenvolvimento de pães modeláveis sem glúten*. 2013. 80 f. Dissertação - (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S.; DATTA, A. K. (2005). *Engineering properties of foods*. Em C. Ratti, *Advances in food* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press.

RATTI, C. (2001). Hot air freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 311-319.

RATTI, C.; KUDRA, T. (2006). Drying of foamed biological materials: opportunities and challenges. *Drying Technology*, v. 24, p. 1101-1108. doi:10.1080/07373930600778213

RAUPP, D. S.; GABRIEL, L. S.; VEZZARO, A. F.; DAROS, P. A.; CHRESTANI, F.; GARDINGO, J. R.; BORSATO, A. V. (2007). Tomate longa vida desidratado em diferentes temperaturas de secagem. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 29, p. 33-39.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. (2007). *Química dos alimentos*. Água. São Paulo: Blucher.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILHA-ZAKOUR, O. (2008). Drying kinetics of grape seeds. *Journal of Food Engineering*, v. 89, p. 460-465. doi:10.1016/j.jfoodeng.2008.05.030

ROCHA, C. T. *Obtenção do suco misto de açaí, morango e acerola em pó por diferentes processos de secagem*. 2013. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Ciências

e Tecnologia de Alimentos. Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre - ES.

RONCHETI, E. F. S. *Estudo do Processo de Secagem em Leito de espuma de cenoura, tomate, beterraba e morango*. 2014. Dissertação (Mestrado). Ciências e Tecnologia de Alimentos. Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre - ES.

ROSA, J. S.; GODOY, R. L. O.; OIANO NETO, J.; CAMPOS, R. S.; MATTA, V. M.; FREIRE, C. A.; SILVA, A. S.; SOUZA, R. S. (2007). Desenvolvimento de um método de análise de vitamina C em alimentos por cromatografia líquida de alta eficiência e exclusão iônica. *Ciência e tecnologia de alimentos*, v. 27, p. 837-846.

RUFINO, M. D. S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; MORAIS, S. M.; SAMPAIO, C. G.; JIMÉNES, J. P. (2007). Metodologia científica: determinação da atividade antioxidante total em frutas pela captura do radical livre ABTS. *Embrapa Agroindústria Tropical Comunicado Técnico*.

RUPASINGHE, H. P. V.; JAYASANKAR, S.; LAY, W. (2006). Variation in total phenolics and antioxidant capacity among European plum genotypes. *Scientia Horticulture*. v.108, p.243–246.

SACILIK, K.; ELICIN, A. K.; UNAL, G. (2006). Drying kinetics of Üryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 76, p. 362–368.

SAHRAIAN, A.; GHANIZADEH, A.; KAZEMEINI, F. (2015). Vitamin C as an adjuvant for treating major depressive disorder and suicidal behavior, a randomized placebo-controlled clinical trial. *Trials*, v. 14, p. 16–94.

SALAH, M. R.; MOHEBBI, M.; TAGHIZADEH, M. (2015). Foam-mat drying of Cantaloupe (*Cucumis melo*): optimization of foaming parameters and investigating drying characteristics. *Journal of food processing and preservation*, v. 39, p. 1798-1808. doi:10.1111/jfpp.12414

SALAZAR, N. A.; ALVAREZ, C.; ORREGO, C. E. (2018). Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Drying technology*, v. 36, p. 192-204. doi: 10.1080/07373937.2017.1315431

SÁNCHEZ-MORENO, C; PLAZA, L; ANCOS, B; CANO, M. P. (2003). Quantitative bioactive compounds assessment and their relative contribution to the antioxidant capacity of commercial orange juices. *Journal of the Science of Food Agriculture*, v. 83, p. 430-439.

SANGAMITHRA, A.; SIVAKUMAR, V.; JOHN, S.; KANNAN, K. (2016). Optimization of foaming properties and foam mat drying of muskmelon using soy protein. *Journal of Food Process and Engineering*, v. 39, p. 692-701. doi:10.1111/jfpe.12261

SANGAMITHRA, A.; SIVAKUMAR, V.; KANNAN, K.; JOHN, S. (2015). Foam-mat drying of muskmelon. *International journal of food engineering*, v. 11, p. 127-137. doi:10.1515/ijfe-2014-0139

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F. (2004). Foaming and drying behavior of ripe bananas. *LWT*, v. 37, p. 517-525. doi:10.1016/S0023-6438(03)00132-4

SAUTER, E.; MONTOURE, J. (1972). The relationship of lysozyme content of egg white to volume and stability of foams. *Journal of Food Science*, v. 37, p. 918-920. doi:10.1111/j.1365-2621.1972.tb03703.x

SCHNEIDER, N. A.; AZEVEDO FILHO, W. S. (2014). Epidemiologia da escaldadura das folhas da ameixeira. *Caderno de pesquisa, série Biologia*, v. 26, p. 25-40. doi:10.17058/cp.v26i2.5247

SCHWARTZBERG, H. G.; CHAO, R. Y. (1982). Solute diffusivities in leaching processes. *Food Technology*, v.36, n.2, p.73-86.

SGARBIERI, V. C. (1996). *Proteínas em alimentos protéicos*. São Paulo: Verla. 517p.

SHAARI, N.; SULAIMAN, R.; RAHMAN, R.; BAKAR, J. (2018). Production of pineapple fruit (*Ananas comosus*) powder using foam mat drying: Effect of whipping time and egg albumen concentration. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 42, p. 1-10. doi:10.1111/jfpp.13467

SHAMI, N. J. I. E.; MOREIRA, E. A. M. (2004). Licopeno como agente antioxidante. *Revista de Nutrição*, v. 17 (2), p. 227-236. doi: 10.1590/S1415-52732004000200009.

SHARAF-ELDEEN, Y. I.; BLAISDELL, J. L.; HAMDY, M. Y. (1980). A model for air corn drying. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, v. 23, p. 1261-1265. doi:10.13031/2013.34757

SHISHIR, M. R.; TAIP, F. S.; SAIFULLAH, M.; YOUNG, S. Y., A.; A. N.; TALIB, R. A. (2018). Changes in quality attributes of pink guava (*Psidium guajava*) powder with respect to different drying techniques and maltodextrin concentrations. *International Food Research Journal*, v. 25, p. 1625-1632.

SHISHIR, M.; TAIP, F.; AZIZ, N.; TALIB, R. (2014). Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, v. 2, p. 74-81. doi:10.1016/j.aaspro.2014.11.011

SILVA, P. M.; GAUCHE, C.; GONZAGA, L. V.; COSTA, A. C.; FETT, R. (2016). Honey: chemical composition, stability and authenticity. *Food chemistry*, v. 196, p. 309-323.

SILVEIRA, R. Ameixa: produção e qualidade crescem em São Paulo. Canal Rural, 2017. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/programas/ameixa-producao-qualidade-crescem-sao-paulo>>. Acesso em: 03 setembro 2020.

SJODIN, B.; WESTING, Y. H.; APPLLE, F. S. (1990). Biochemical mechanisms for oxygen free radical formation during exercise. *Sports Medicine*. v. 10, p. 236-254.

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

SOGI, D. S.; SIDDIQ, M.; DOLAN, K. D. (2015). Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT - Food Science and Technology*, v. 62, p. 564-568. doi:10.1016/j.lwt.2014.04.015

STACEWICZ-SAPUNTZAKIS, M.; BOWEN, P. E.; HUSSAIN, E. A.; DAMAYANTI-WOOD, B. I.; FARNSWORTH, N. R. (2001). Chemical composition and potential health effects of prunes: A functional food? *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 41, p. 251–286.

STADELMAN, W. J.; COTTERILL, O. J. (1995). *Egg science and technology*. 3rd Ed. Wesport: AVI Publisher company. 449 p.

TACO - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. (2011). *NEPA – NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ALIMENTAÇÃO*. (4ª ed.). Campinas: Editora Unicamp.

TAGLIAZUCCHI, D.; VERZELLONI, E.; CONTE, A. (2008). Antioxidant properties of traditional balsamic vinegar and boiled must model systems. *European Food Research and Technology*, v. 227, p. 835–843.

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. (2012). Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams. *LWT - Food Science & Technology*, v. 47, p. 348-357. doi:10.1016/j.lwt.2012.01.030

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam-mat. *Journal of Food Engineering*, v. 86, p. 573-583. doi:10.1016/j.foodeng.2007.11.008

TONON, R.; BRABET, C.; HUBINGER, M. (2010). Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea Mart.*) juice produced with different carrier agents. *Food Research International*, v. 43, p. 907-914. doi:10.1016/j.foodres.2009.12.013

TZE, N.; HAN, C.; YUSOF, Y.; LING, C.; TALIB, R.; TAIP, F.; AZIZ, M. (2012). Physicochemical and nutritional properties of spray-dried pitaya fruit powder as natural colorant. *Food Science and Biotechnology*, v. 21, p. 675–682. doi:10.1007/s10068-012-0088-z

VACCA, R. A.; PINTO, M. C.; VALENTI, D.; PASSARELLA, S.; MARRA, E.; GARA, L. (2004). Production of reactive oxygen species, alteration of cytosolic ascorbate peroxidase, and impairment of mitochondrial metabolism are early events in heat shock-induced programmed cell death in tobacco bright yellow 2 cells. *Plant physiology*, v. 134, p. 1100-1112.

VALKO, M.; LEIBFRITZ, D.; MONCOL, J.; CRONIN, M. T.; MAZUR, M.; TELSER, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, v. 39, p 44-84.

VANGDAL, E.; PICCHI, V.; FIBIANI, M.; LO SCALZO, R. (2017). Effects of the drying technique on the retention of phytochemicals in conventional and organic plums (*Prunus domestica* L.). *LWT - Food Science and Technology*, v. 85, p. 506-509.

VERMA, L. R.; BUCKLIN, R. A.; ENDAM, J. B.; WRATTEN, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, v. 28, p. 296-301. doi:10.13031/2013.32245

VERNON-CARTER, E.; ESPINOSA-PAREDES, G.; BERISTAIN, C.; ROMERO-TEHUITZIL, H. (2001). Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavor retention of tamarind foam-mats. *Food Research International*, v. 34, p. 587–598.

VIEIRA, A. S. *Secagem de Resíduo de Goiaba em Secador Convectivo de Bandejas: Modelagem Matemática e Análise do Processo*. 2014. Tese (Doutorado). Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia química, Programa de pós-graduação em Engenharia química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal - RN.

VIMERCATI, W. C.; MACEDO, L. L.; ARAÚJO, C. S.; TEIXEIRA, L. J. Q.; SARAIVA, S. H. (2019). Effect of temperature on drying kinetic in foam mat and anthocyanin degradation in

strawberry. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, e2018221. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.22118>.

VISHWANATHAN, K. H.; HEBBAR, H. U.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. (2010). Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. *Food Science and Technology Research*. v. 16, n. 5, p. 381-388.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. (1978). *A single layer drying equation for rough rice*. ASAE Paper No: 78-3001. St. Joseph, MI: ASAE.

WANG, Y.; LIU, X.; ROBITAILLE, L.; EINTRACHT, S.; MACNAMARA, E.; HOFFER, L. (2013). Effects of vitamin C and vitamin D administration on mood and distress in acutely hospitalized patients. *The American Journal of Clinical Nutrition*, v. 98, p. 705–711.

WEINBERGER, J. H. PLUMS. IN: JANICK, J.; MOORE, J. N. (Ed.). (1975). *Advances in fruit breeding*. West Lafayette: Purdue University, p. 336-347

WELTI, J.; VERGARA, F. (1997). Atividade de água / conceito y aplicación em alimentos com alto contenido de humedad. *Temas em tecnologia de alimentos*, v. 1, p. 11-26.

WELTY, J. R.; WICKS, C.; WILSON, R. (1983). *Fundamentals of momentum, heat and mass transfer* (3ª ed.). Singapore: John Wiley.

WILFORD, L. G.; SABAREZ, H.; PRICE, W. E. (S.D.). Kinetics of carbohydrate change during dehydration of d'Agen prunes. *Food Chemistry*, v. 59, p. 149–155.

WILSON, R.; KADAM, D.; CHADHA, S.; SHARMA, M. (2012). Foam mat drying characteristics of mango pulp. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, p. 63–69.

WINTERBOURN, C. C. (2008). Reconciling the chemistry and biology of reactive oxygen species. *Nature Chemical Biology*, v. 4, p 278-286.

WOJDYŁO, A.; FIGIEL, A.; LECH, K.; NOWICKA, P.; OSZMIANSKI, J. (2014). Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries. *Food and Bioprocess Technology*, v. 7, p. 829-841. doi:10.1007/s11947-013-1130-8

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, v. 19, p. 583-597. doi:10.1081/DRT-100103936

YU, B. P. (1994). Cellular defenses against damage from reactive oxygen species. *Physiological Reviews*. v. 74, p.139-161.

ZAGHDOUDI, K.; PONTVIANNE, S.; FRAMBOISIER, X.; ACHARD, M.; KUDAIBERGENOVA, R.; AYADI-TRABELSI, M.; KALTHOUM-CHERIF, J.; VANDERESSE, R.; FROCHOT, C.; GUIAVARC'H, Y. (2015). Accelerated solvent extraction of carotenoids from: Tunisian Kaki (*Diospyros kaki* L.), peach (*Prunus persica* L.) and apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Food Chemistry*, v. 184, p. 131-139.

ZANOELO, E. F.; CELSO, G. M.; KASKANTZIS, G. (2007). Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. *Byosystems Engineering*. v. 96, n. 4, p. 487 – 494.