

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI

**PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NA OBTENÇÃO DO PÓ DE GRAVIOLA
PELO MÉTODO DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

B222p
2015
Baptestini, Fernanda Machado, 1984-
Parâmetros físico-químicos na obtenção do pó de graviola
pelo método de secagem em leito de espuma / Fernanda
Machado Baptestini. – Viçosa, MG, 2015.
xi, 106f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Paulo César Corrêa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.90-101.

1. Graviola. 2. Estabilidade. 3. Isotermas. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 634.41

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI

**PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS NA OBTENÇÃO DO PÓ DE GRAVIOLA
PELO MÉTODO DE SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de abril de 2015



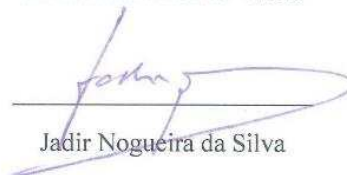
Gerd Volkhard Scholz



Erica Nascif Rufino Vieira



Evandro de Castro Melo



Jadir Nogueira da Silva



Paulo Cesar Corrêa

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, força para a conclusão deste trabalho e por ter colocado pessoas maravilhosas em minha vida.

Aos meus pais pelo amor, amizade e incentivo e por sempre terem trabalhado para que eu e meus irmãos fossemos pessoas dignas.

Aos meus irmãos pela amizade, carinho e apoio.

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação, conselhos, ensinamentos, oportunidade e apoio para que eu conseguisse concluir esta importante etapa de minha formação pessoal e profissional.

Aos professores Mateus da Silva Junqueira, Afonso Mota Ramos e Paulo Roberto Cecon, pelo auxílio e sugestões.

Aos amigos pela amizade sincera e irrestrita, incentivo e disponibilidade na condução dos trabalhos.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), pela amizade e ajuda na realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela ajuda na realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que de alguma forma contribuíram para que essa importante etapa de minha vida se realizasse.

BIOGRAFIA

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI, filha de João Baptistini e Luzia Machado Baptistini, nasceu em Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, em 17 de janeiro de 1984.

Em março de 2004, iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, graduando-se em julho de 2009. No período de setembro de 2007 a junho de 2009, foi bolsista Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico atuando no laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade.

Em agosto de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de dissertação em julho de 2011.

Em setembro do mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese em abril de 2015.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Graviola.....	3
2.2. Emulsões e Emulsificantes	4
2.3. Secagem em leito de espuma	7
2.4. Isotermas	8
3. OBJETIVO	12
3.1. Objetivo geral.....	12
3.2. Objetivos específicos	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS	13
4.1. Matéria-Prima.	14
4.2. Caracterização das propriedades físico-químicas da polpa de graviola.	14
4.2.1. Teor de água.....	14
4.2.2. Atividade de água (A_w).	14
4.2.3. Acidez total titulável (ATT).....	14
4.2.4. pH.....	14
4.2.5. Teor de sólidos solúveis totais (SST).....	15
4.2.6. Determinação do teor de açúcares solúveis totais e redutores.	15
4.2.7. Cor.	15
4.2.8. Massa específica aparente.....	16
4.3. Processo de formação e caracterização da espuma.	16
4.3.1. Determinação do teor de água, A_w , ATT, pH, SST, açúcares totais e redutores, cor e massa específica aparente.	17
4.4. Seleção do emulsificante e da concentração para a produção de espuma de graviola. ...	17
4.4.1. Determinação da massa específica aparente.	17
4.4.2. Determinação da expansão.....	18
4.4.3. Determinação da estabilidade.	18
4.4.4. Análise estatística.....	19
4.5. Secagem em leito de espuma.	19
4.5.1. Determinação do Coeficiente de Difusão Efetiva (D_{ef}).	20
4.5.2. Influência da temperatura.....	21
4.5.3. Análise estatística.....	21
4.6. Isotermas de sorção.....	22

4.6.1. Propriedades termodinâmicas associadas à sorção de água na monocamada	23
4.6.2. Propriedades termodinâmicas da sorção de água.....	24
4.7. Propriedades físico-químicas do pó de graviola.	26
4.7.1. Massa específica unitária.	27
4.7.2. Massa específica aparente.....	28
4.7.3. Porosidade.....	28
4.7.4. Ângulo de repouso.	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. Características físico-químicas da polpa e da espuma de graviola.	30
5.2. Seleção do emulsificante e da concentração para a produção de espuma de graviola. ...	49
5.3. Secagem em leite de espuma.	55
5.4. Isotermas de sorção.....	67
5.5. Propriedades físico-químicas do pó de graviola.	74
6. CONCLUSÕES	88
7. PERSPECTIVAS FUTURAS	89
8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	90
9. ANEXO.....	102

NOMENCLATURA

- EX: expansão da espuma, %
- ρ_{espuma} : massa específica da espuma, kg m^{-3}
- ρ_{polpa} : massa específica da polpa, kg m^{-3}
- U_c : teor de água crítico, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$
- U_t : teor de água num tempo t , $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$
- n : taxa de secagem no período constante, min^{-1}
- U_o : teor de água inicial, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$
- k : taxa de secagem no período decrescente, min^{-1}
- t_c : tempo crítico, min.
- U_e : teor de água no equilíbrio, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$.
- t : tempo de secagem, min
- k : constante de secagem, min^{-1}
- a, b, c, n : coeficientes dos modelos, adimensionais.
- L : espessura do produto, m
- D_{ef} : coeficiente de difusão efetiva, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
- n : número de termos da equação
- D_0 : fator pré-exponencial
- E_a : energia de ativação, J mol^{-1}
- R : constante universal dos gases, $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- T_a : temperatura absoluta, K.
- Y_i : valor observado
- \hat{Y}_i : valor estimado
- n : número de dados observados
- GLR: graus de liberdade do resíduo
- U_m : teor de água da monocamada, % b.s.
- A_w : atividade de água, decimal
- C e K : parâmetros do modelo de GAB que são relacionados, respectivamente, às propriedades da monocamada e multicamadas, adimensionais
- a, b e c : parâmetros de ajuste dos modelos
- T : temperatura, $^{\circ}\text{C}$
- U_{m0} : fator pré-exponencial, % b.s.
- C_0 e K_0 : fatores pré-exponenciais, adimensionais
- $\Delta H_1, \Delta H_2$ e ΔH_3 : incrementos de entalpia associadas à variação dos parâmetros do modelo de GAB com a temperatura, kJ kg^{-1} .
- Δh_{st} : calor isostérico líquido de sorção ou entalpia diferencial, kJ kg^{-1} .

C_1 : constante de integração, adimensional.
 L : calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1}
 Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} .
 ΔS : entropia diferencial de sorção, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
 ΔG : energia livre de Gibbs, kJ kg^{-1} .
 T_B : temperatura isocinética, K
 ΔG_B : energia livre de Gibbs à temperatura isocinética, kJ kg^{-1} .
 T_{hm} : média harmônica da temperatura, K
 n : número de temperaturas utilizadas.
 m : número de pares de dados de entalpia e entropia
 $\Delta \bar{H}$: entalpia média, kJ kg^{-1}
 $\Delta \bar{S}$: entropia média, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.
 P_1 : pressão inicial, psi
 P_2 : pressão final, psi
 V_a : volume da câmara da amostra, cm^3
 V_s : volume do sólido, cm^3
 V_e : volume da câmara de expansão, cm^3
 ρ_u : massa específica unitária, kg m^{-3}
 m_s : massa de sólidos, g.
 ε : porosidade, %
 ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} .
 α : ângulo de repouso, em graus
 D : diâmetro da plataforma circular, mm
 h : altura do cone de pó, mm.
 a^* : coordenada a^* , adimensional
 b^* : coordenada b^* , adimensional
 L^* : coordenada L^* , adimensional
 C^* : croma, adimensional
 h^* : ângulo hue, graus
 ΔE : diferença total de cor, adimensional
 BI : índice de escurecimento, adimensional
 RU : razão de umidade, adimensional

RESUMO

BAPTESTINI, Fernanda Machado, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2015. **Parâmetros físico-químicos na obtenção do pó de graviola pelo método de secagem em leito de espuma.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Coorientadores: Mateus da Silva Junqueira e Afonso Mota Ramos.

Objetivou-se estudar e caracterizar o processo de produção de graviola em pó pelo método de secagem em leito de espuma através da escolha do melhor emulsificante e concentração, bem como determinar as propriedades físico-químicas do produto in natura, da espuma e do pó formado além disso, obter as isotermas de sorção e as propriedades termodinâmicas. Foram utilizados frutos de graviola (*Annona muricata* L.) das quais a polpa foi obtida e acondicionada em garrafas tipo PET higienizadas com água clorada, e armazenada em freezer a -18 °C para posterior utilização. Foram adicionados à polpa os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas proporções de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa. Essa mistura foi submetida à agitação, em uma batedeira doméstica por 15 min para a obtenção da espuma. Em seguida foram feitas as seguintes análises: teor de água, atividade de água, acidez total titulável, pH, teor sólidos solúveis totais, açúcares solúveis totais e redutores, cor e massa específica aparente, estabilidade e expansão. Para a secagem, a melhor espuma obtida considerando-se os diferentes emulsificantes e concentrações foi espalhada sobre bandejas formando uma camada fina de cerca de 5,0 mm de espessura. Em seguida, a espuma foi levada para a secagem em estufa de circulação forçada de ar na qual as temperaturas e a velocidade do ar de secagem foram de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, e 5,6 m s⁻¹, respectivamente. Utilizando-se dados da perda de água durante a secagem foi proposto e ajustados modelos matemáticos, determinado o coeficiente de difusão efetiva e a energia de ativação. Após a secagem o pó formado foi utilizado para obtenção do teor de água no equilíbrio, pelo método estático em câmaras tipo BOD mantidas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C e dessecador com soluções saturadas. Aos dados observados do equilíbrio higroscópico foram ajustados modelos matemáticos e calculadas as propriedades termodinâmicas como, calor isostérico integral de sorção, entropia e energia livre de Gibbs. Também foram determinadas as seguintes propriedades físico-químicas do pó: teor de água, atividade de água, acidez total titulável, pH, teor de sólidos solúveis totais, açúcares solúveis totais e redutores, cor e massa específica aparente e unitária, porosidade e ângulo de repouso. As propriedades físico-químicas das espumas indicam que as alterações apresentadas não comprometem a possível secagem em leito de espuma do produto; A albumina na concentração de 7,43% foi o melhor emulsificante para a produção de espuma de graviola uma vez que atendeu aos critérios de massa específica, expansão e estabilidade; O modelo de Midili se ajustou bem aos dados experimentais da secagem de espuma de graviola sendo, portanto apto a descrever o fenômeno em estudo; O

modelo proposto para determinar o ponto de transição entre o período de taxa de secagem constante e o de taxa de secagem decrescente ajustou-se bem aos dados experimentais podendo servir como uma ferramenta para determinar o teor de água crítico e o tempo crítico; Obteve-se acréscimo no coeficiente de difusão efetiva com a elevação da temperatura de secagem e energia de ativação de 33,10 kJ mol⁻¹; Os modelos de GAB, Halsey modificado e Sigma-Copace são aptos para descrever o fenômeno de sorção de água do pó de graviola; As propriedades termodinâmicas apresentaram comportamento ímpar devido aos elevados teores de açúcares encontrado no pó; As propriedades físico-químicas do pó de graviola indicam boa estabilidade do produto obtido pelo método de secagem em leito de espuma.

ABSTRACT

BAPTESTINI, Fernanda Machado, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2015. **Physico chemical parameters in getting the soursop powder by drying in foam bed.** Advisor: Paulo Cesar Correa. Co-Advisors: Mateus da Silva Junqueira and Afonso Mota Ramos.

The objective was to study and characterize the soursop production process powder by drying in foam bed by choosing the best emulsifier and concentration as well as determine the physical and chemical properties of the product in natura, foam and powder formed. Furthermore, to obtain the sorption isotherms and thermodynamic properties. Soursop fruits were used (*Annona muricata* L.) of which the pulp was obtained and packaged in PET type bottles sanitized with chlorinated water, and stored at -18°C for later use. Albumin, emustab[®], maltodextrin and superaliga neutra[®] were added to the pulp in proportions of 0.0, 2.5, 5.0, 7.5 and 10.0%. This mixture was subjected to agitation in a household mixer for 15 min to obtain the foam. Then the following analyzes were performed: water content, water activity, titratable acidity, pH, soluble solids content, total soluble and reducing sugars, color, bulk density, stability and expansion. For drying, the best foam obtained considering different emulsifiers and concentrations, was spread on trays forming a thin layer about 5.0 mm thick. Then, the foam was taken for drying in a forced air circulation oven in which the drying temperature and air velocity were 40, 50, 60, 70 and 80°C , and 5.6 m s^{-1} respectively. Using data water loss during drying has been proposed and adjusted mathematical models to determine effective diffusion coefficients and activation energy. After drying, the formed powder was used to obtain the water content at equilibrium with the static method in BOD chambers maintained at temperatures of 10, 20, 30, 40 and 50°C and desiccator with saturated solutions. To observed data of the equilibrium moisture content were adjusted mathematical models and calculated the thermodynamic properties as integral isosteric heat of sorption, entropy and Gibbs free energy. It was also determined the following physical and chemical properties of powder: water content, water activity, titratable acidity, pH, total soluble solids, total and reducing sugars, color, apparent and true density, porosity and angle of repose. The physicochemical properties of foams indicate that the proposed amendments do not affect the drying of the product in foam bed; Albumin at a concentration of 7.43% was the best emulsifier for soursop foam production since it met the criteria density, expansion and stability; The model Midili fitted well to the experimental data of the foam drying soursop is therefore able to describe the phenomenon under study; The proposed model for determining the point of transition between the period of constant rate drying and the decreasing rate of drying set and the experimental data can serve as a tool to determine the critical water content and the critical time; Obtained increase in the effective diffusion coefficient with drying temperature rise and

activation energy of $33.10 \text{ kJ mol}^{-1}$; The models of GAB, modified Halsey and Sigma-COPACE are able to describe the water sorption phenomenon of soursop powder; The thermodynamic properties showed odd behavior due to the high sugar content found in the powder; The physico-chemical properties of the powder soursop indicate good stability of the product obtained by the drying in foam bed method.

1. INTRODUÇÃO

A graviola (*Annona muricata* L.) é um fruto pertencente à família das anonáceas originária das terras baixas da América Tropical. No Brasil, ela é especialmente cultivada nos estados do nordeste, e a produção é destinada, principalmente, para a agroindústria, onde é utilizada na fabricação de suco, sorvete, compotas e doces cristalizados (FIGUEIRÊDO, 2013). Recentemente, foram feitas descobertas quanto à capacidade de componentes bioativos extraídos de diferentes partes da planta em agir contra as células do câncer de pâncreas (TORRES et al., 2012), e de mama (DAI et al., 2011).

Apesar da boa aceitação dos consumidores brasileiros por alimentos feitos a partir de frutos de graviola e do mesmo in natura, este é perecível como a maioria dos frutos tropicais, deteriorando-se em poucos dias, o que dificulta sua comercialização resultando em aumento das perdas. Além disso, a produção nacional ainda é insuficiente para atender a demanda e há a sazonalidade de produção. Logo, processos para conservação de alimentos, como a secagem e a refrigeração, são aplicáveis nestas situações.

A desidratação é um dos processos mais antigos utilizados na conservação de alimentos. A secagem permite a remoção da água, reduzindo assim, a deterioração microbiológica e as taxas de reações de degradação, e possibilita a disponibilização de alimentos sazonais, impedindo a perda de valor comercial. Ademais, a desidratação reduz a massa e o volume do produto, aumentando a eficiência de transporte e de armazenamento. Também agrega valor aos alimentos, uma vez que um produto de propriedades físicas e químicas diferenciadas do mesmo in natura, é disponibilizado ao mercado.

Tecnologias que permitam processar o fruto na forma de pó, fazendo com que este, que antes era consumido só em sua época de safra, hoje possa ser consumido em qualquer período do ano é uma alternativa que vem sendo utilizada. Dentre estas pode-se citar a liofilização, spray dryer, secagem em leito de espuma e outras. Entretanto, a liofilização e o spray dryer são técnicas caras em comparação a secagem em leito de espuma sendo inviável para a indústria de pequeno e médio porte.

A secagem em leito de espuma (foam-mat drying) é uma das técnicas empregadas para a obtenção de produtos alimentícios em pó, destacando-se por ser um método em que alimentos líquidos ou semilíquidos são transformados em espumas estáveis, através de vigorosa agitação e incorporação de agentes espumantes para, posteriormente, serem desidratados (SILVA et al., 2008). Esse tipo de processo consiste basicamente em três etapas: transformação do suco ou da polpa em espuma estável, com aditivos; desidratação do material em camada fina até massa constante e desintegração da massa seca em escamas e, finalmente, em pó (FURTADO et al., 2010).

A indústria de alimentos em pó tem se expandido notavelmente devido às vantagens que a utilização e o manejo dos materiais oferecem, principalmente, no que diz respeito ao seu emprego como matéria-prima ou aditivo, à facilidade de conservação em longo prazo e ao baixo

custo de transporte e de armazenamento (SOUZA, 2009). Além disso, o fato de os consumidores terem o conhecimento de que produtos provenientes de frutas são na maioria das vezes saudáveis e nutritivos, e a necessidade de alimentos que sejam de mais rápido preparo são oportunidades para o crescimento desta indústria.

A indústria de alimentos em pó ainda necessita desenvolver as áreas associadas a dados e informações sobre o processo de produção e as propriedades físico-químicas de alguns pós, sendo que a medida e caracterização destas ajudam a definir o produto, os parâmetros do processo de produção e os fenômenos que influenciam no seu comportamento. Assim sendo, um completo conhecimento do processo e destas propriedades auxiliará no avanço tecnológico da indústria alimentícia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Graviola

A família Annonaceae compreende grande número de gêneros e espécies, a maioria nativa das regiões tropicais ou subtropicais. Muitas dessas espécies têm interesse como frutíferas comerciais, sendo cultivadas em vários países (CRUZ, 2011).

Na família, três gêneros são importantes: *Annona*, *Rollinia* e *Albernonia*. No gênero *Rollinia*, tem-se *Rollinia silvatica* (araticum-do-mato), *Rollinia mucosa* (biribá), *Rollinia escalbida* (araticum ou quaresma) e no gênero *Albernonia*, *Albernonia purpurea* (marolo) e a *Albernonia lanceolata* (pindaíba) (MANICA, 1997).

Dentro do gênero *Annona*, as principais espécies que produzem frutos comestíveis, as mais conhecidas e de maior importância econômica são: graviola (*Annona muricata* L.); pinha, ata ou fruta-do-conde (*Annona squamosa* L.); cherimólia (*Annona cherimola* Mill.) e atemóia (híbrido de *Annona cherimolia* x *Annona squamosa*). Essas quatro anonáceas produzem frutos bastante aromáticos, de sabor agradável, açucarado e ligeiramente ácido (MOSCA et al., 2006).

A graviola é considerada a fruta mais tropical das anonáceas (FREITAS et al., 2013). Originária da América Central e norte da América do Sul, pode ser encontrada disseminada em toda faixa equatorial do planeta. É conhecida como “soursop” na língua inglesa, “guanabano” no idioma espanhol e “corossol” em francês. No Brasil foi introduzido pelos portugueses no século XVI (SOBRINHO, 2010).

Segundo Mosca et al. (2006), o fruto é uma baga composta, frutos múltiplos ou sincarpo, carnoso, o maior do gênero *Annona*, medindo de 16 a 30 cm de comprimento por 11 a 21 cm de largura, com peso de 1 a 10 kg, de forma elipsoidal ou ovóide. Os carpelos aparecem separados por um sulco fino e, na maioria das cultivares, apresentam no centro um pseudo-espinho curvo para baixo; eles são carnosos, curtos e moles, entretanto, registram-se, também, frutos quase lisos. Ainda sobre os frutos, estes têm polpa branca, suculenta e ligeiramente ácida, muito aromática, de sabor agradável e alto conteúdo de vitaminas A e C. As sementes, acima de 100 por fruto, são ovóides e aplainadas, medindo entre 10 e 20 mm de comprimento, pesando entre 0,33 e 0,59 g, tendo a testadura e cor marrom-escuro-brilhante (PINTO, 2005).

Como as demais anonáceas, atemóia, pinha, cherimóia, a graviola é consumida como fruto fresco, mas, na forma de sorvete, suco, néctar, geleias, doces, pós é a que interessa a agroindústria pois nestas formas o valor agregado ao produto final possibilita maior rentabilidade.

Segundo a medicina popular, diversas partes da gravioleira podem ser utilizadas como vermífugo, antitérmico, sedativos, anti-espasmos, anti-convulsivo e anti-hipertensivo (FERREIRA et al., 2013). Isso tem levado os pesquisadores da medicina tradicional a considerar as propriedades dessa planta. E recentes descobertas mostram a capacidade de componentes bioativos extraídos de diferentes partes da planta em agir contra as células do câncer de pâncreas (TORRES et al., 2012), e de mama (DAI et al., 2011), e terem efeito antidiabético e antioxidante (FLORENCE et al., 2014).

2.2. Emulsões e Emulsificantes

Colóide, ou sistema coloidal, consiste numa mistura na qual uma ou mais substâncias se encontram uniformemente dispersas numa outra substância, sob a forma de pequenas partículas, formadas por agregados de moléculas (ARAÚJO, 2011).

Diz-se que um sistema é coloidal quando as dimensões das partículas que constituem a fase dispersa se situam entre 2 e 1000 nm (LEVINE, 2004). Abaixo de 2 nm a mistura é considerada homogênea e acima de 1000 nm a mistura é heterogênea.

Os colóides podem ser classificados de acordo com o estado físico da fase dispersa e da fase contínua, tal como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos colóides de acordo com o estado físico da fase dispersa e da fase contínua

		fase dispersa		
		gás	líquido	sólido
fase contínua	gás	nenhum (todos os gases são miscíveis)	aerosol líquido	aerosol sólido
	líquido	espuma líquida	emulsão	sol
	sólido	espuma sólida	emulsão sólida/gel	sol sólido

Fonte: SHAW, 2003.

As espumas são um estado de dispersão de bolhas de gás, geralmente ar, suspensas dentro de um sólido ou de um líquido (DAVIS e FOEGEDING, 2007). Elas podem ser classificadas como sólidas ou líquidas (Tabela 1). As sólidas são materiais plásticos ou elásticos no qual seu comportamento reológico depende principalmente das propriedades físicas da fase sólida e da densidade do material. As espumas líquidas são mais difíceis de caracterizar, em geral constituem de uma fase de ar descontínua que se dispersa em uma fase contínua de líquido, essas são instáveis requerendo o uso de agentes de superfície para manter a estabilidade mediante a redução da tensão superficial (PERNELL et al., 2002).

As espumas são utilizadas para proporcionar textura, consistência e aparência em diferentes tipos de produtos alimentícios. Como exemplo, têm-se os bolos, biscoitos, merengues e pães (CAMPBELL e MOUGEOT, 1999).

De acordo com Campbell e Mougeot (1999), existem três métodos de incorporação de ar nos alimentos: batadura, borbulhamento e a geração do gás *in situ*. Além disso, os mesmos afirmam que os sistemas aerados, como as espumas, são inerentemente instáveis termodinamicamente, podendo durar segundos no caso da espuma de vinho e cerveja, e algumas horas como a clara de ovo batida e o chantilly. Mas há aqueles que duram até anos como os sorvetes e merengues.

A instabilidade das espumas se deve a dois fatores principais: a tendência de os filmes líquidos sofrerem drenagem e se tornarem mais finos e a tendência à ruptura em consequência de perturbações aleatórias. Para conseguir um nível razoável de estabilidade faz-se necessário um terceiro componente, um agente espumante. No entanto, bons agentes emulsificantes são em geral também bons agentes espumantes, já que os fatores que afetam a estabilidade de emulsões e das espumas são até certo ponto semelhantes (SHAW, 2003).

Os emulsificantes são moléculas anfifílicas (Figura 1), possuem região polar, solúvel em água e não polar, insolúvel em água, na mesma molécula (ARAÚJO, 2011). Quando adicionados a um sistema com água, como em polpa de frutos e hortaliças, este irá saturar a superfície do líquido até um ponto onde a tensão superficial é reduzida a um valor muito baixo. Neste momento a penetração de bolhas de ar no líquido, através da agitação, é facilitada garantindo assim uma maior aeração interna (PALMA et al., 2004). As moléculas do emulsificante dentro do líquido terão sua porção lipofílica orientada para as bolhas de ar e a porção hidrofílica orientada externamente para o meio contínuo que é a água. Esta configuração permitirá a estabilidade da espuma formada, garantindo assim uma maior aeração interna do produto (PALMA et al., 2004).

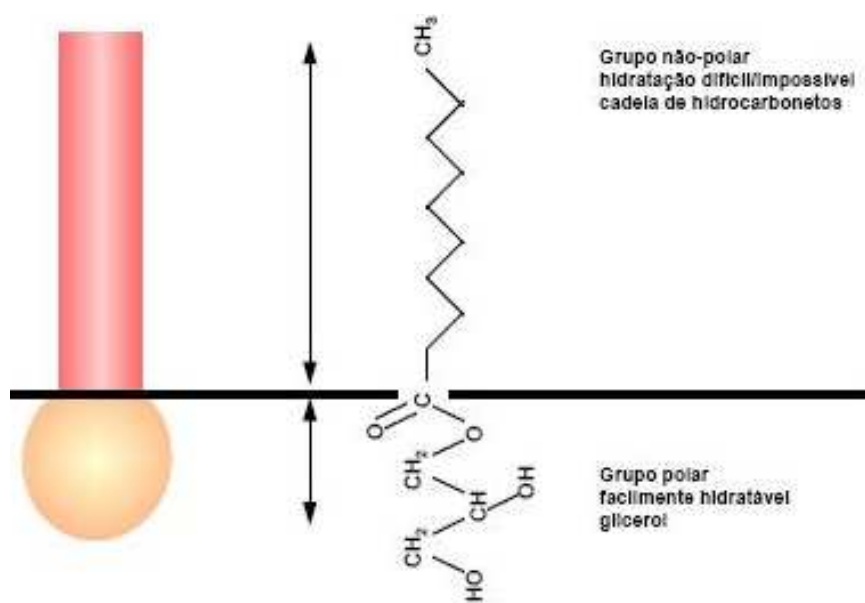


Figura 1: Característica anfifílica do emulsificante.

Fonte: PALMA et al., 2004.

Uma vez que o emulsificante exerça sua função de aderir à superfície das bolhas de ar formadas durante a agitação constituindo, assim, uma membrana impedindo que estas se aproximem o suficiente, evitando a agregação, faz-se necessário muitas vezes o uso de estabilizante. Estes garantem por mais tempo a estabilidade dos 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, além de promover a solubilização de aromas (PALMA et al., 2004).

Existem no mercado grande número de emulsificantes disponíveis para serem utilizados como ingredientes, tendo cada um características próprias e aplicação ótima. Alguns deles são: albumina, emustab[®], superliga[®] e maltodextrina.

A albumina é uma proteína, geralmente derivada de ovos brancos, que age como emulsificante por possuir em sua molécula uma região hidrofílica e outra hidrofóbica. Segundo Prins (1988) citado por Thuwapanichayanan et al. (2008), as proteínas movem através da fase aquosa e são espontaneamente adsorvidas na interface ar-água, onde as películas viscoelásticas são subsequentemente formadas. O resultado da adsorção de proteínas é a redução da tensão superficial, o que melhora a formação de espuma. Além disso, os filmes viscoelásticos são geralmente resistentes à ruptura e a coalescência das bolhas de gás dispersas na fase líquida (KARIM e WAI, 1999).

O emustab[®] é um produto a base de monoglicerídeos de ácidos graxos destilados, monoestearato de sorbitana e polisorbato 60. Já a superliga[®] é um produto à base de sacarose, carboximetil-celulose e goma guar. Esses produtos têm em sua composição moléculas que agem como estabilizante, emulsificante e espessante (ARAÚJO, 2011; BRASIL, 2010).

A maltodextrina é resultado da hidrólise do amido, compondo-se de 5 a 10 unidades de glicose. Os amidos e seus derivados são moléculas hidrofílicas e não tem atividade de superfície, não sendo muito utilizado na indústria de alimentos. Por essa razão, os amidos são frequentemente modificados química, física ou enzimaticamente, com o intuito de melhorar as suas propriedades funcionais, como espessantes, geleificantes e estabilizantes (ARAÚJO, 2011).

Vernon-Carter et al. (2001) estudando o efeito de estabilizantes sob a estabilidade da espuma de tamarindo observaram que o aditivo composto por albumina mais a mistura de Span 60 (éster de sorbitana) com Tween 80 (polissorbato 80) nas concentrações de 1,00 e 0,50% respectivamente, garantiram por mais tempo a estabilidade da espuma contra o colapso. Eles ainda afirmam que a persistência da espuma é considerada importante porque proporciona uma grande área de superfície de secagem durante o processo de desidratação.

Não é apenas o tipo de molécula e sua função que interferem no processo de formação e estabilização de espumas. A concentração das moléculas também é importante. Karim e Wai (1999) observaram que para as espumas de carambola a estabilidade aumentou com o incremento da concentração do aditivo metil celulose. Bastos et al. (2005) estudaram a estabilidade das espumas de manga utilizando o Tween 60[®] em diferentes concentrações e observaram aumento na estabilidade das espumas para todas concentrações testadas, e determinaram uma concentração mínima de 0,5% do agente estabilizante necessário para a produção da espuma, com estabilidade adequada para o processo de secagem. Em contrapartida, Soares et al. (2009) observaram que a estabilidade da espuma de araçá-boi foi mantida constante para diferentes concentrações e emulsificantes. A importância deste tipo de estudo reside na determinação de um nível mínimo

do produto comercial necessário para a produção de espuma de polpa de fruto ou hortaliça, com estabilidade adequada para manter uma estrutura porosa durante o processo de secagem.

A diferença de resultados observada nas pesquisas citadas acima se deve a natureza química dos frutos, como os tipos de açúcares e vitaminas e da concentração e tipo do agente de formação de espuma.

2.3. Secagem em leito de espuma

O método de secagem em leito de espuma foi desenvolvido na década de 1950 por Morgan e sua equipe na Califórnia e patentado em 1961 (SEGURA et al., 1990; BERISTAIN et al., 1991).

Neste processo, o alimento é transformado em uma espuma estável por meio da adição de agentes espumantes e incorporação de ar, nitrogênio ou outros gases, em batedeiras ou outros equipamentos geradores de espuma (FELLOWS, 2006). Em seguida, a espuma é espalhada sobre uma superfície, perfurada ou não, utilizando-se geralmente camada com espessura em torno de 2 a 5 mm. A secagem resulta em um produto poroso e quebradiço, de fácil moagem e transformação em pó com boas propriedades de reidratação (BASTOS et al., 2005).

Este método é muito usado em alimentos sensíveis ao calor, viscosos e com alto índice de açúcar, como os sucos de frutos (SRINIVASAN, 1996 citado por RAJKUMAR et al., 2007) pois requer menores temperaturas de desidratação e menor tempo de secagem, devido à maior área de superfície exposta ao ar e a velocidade de secagem, acelerando assim o processo de remoção de água. Isso faz com que a secagem de uma camada de espuma seja aproximadamente três vezes mais rápida do que a secagem de uma camada similar de líquido (FELLOWS, 2006).

Além das vantagens já citadas, segundo Mishra (2009) citado por Kadam e Balasubramanian (2011) a técnica de secagem em leito de espuma possibilita a obtenção de pó com características mais estáveis em comparação ao produto fresco, pois são reduzidas as atividades microbiológicas, as reações químicas e bioquímicas. Ademais, com o pó reduz-se a manipulação, os custos de transporte, de embalagens e de armazenamento. A preservação da cor, do sabor, das vitaminas, principalmente o ácido ascórbico, das características nutricionais e organolépticas e a ausência de odor também são atrativos desta tecnologia de processamento.

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 a elevadas taxas de produção, o que eleva o custo de investimento inicial (FELLOWS, 2006). Além dessa, outra desvantagem é que os aditivos podem modificar as características de sabor, aroma e cor do alimento. Outra dificuldade relatada por Karim e Wai (1999) é a falta de estabilidade da espuma durante a secagem. Algumas variáveis como a natureza química das matérias-primas, tipo e concentração de agente espumante influenciam na estabilidade das espumas.

O método de desidratação já foi aplicado em: tamarindo (VERNON-CARTER et al. 2001), banana (SANKAT e CASTAIGNE, 2004; THUWAPANICHAYANAN et al. 2008; 2012), carambola (KARIM e WAI, 1999), manga (BASTOS et al. 2005; RAJKUMAR et al. 2007), microalgas verdes (PRASETYANINGRUM e DJAENI, 2012), tomate (KADAM e BALASUBRAMANIAN, 2011), mamão (KANDASAMY et al., 2012), acerola (SOARES et al. 2001), entre outros.

2.4. Isotermas

A água desempenha um importante papel no que diz respeito às propriedades dos alimentos, influenciando as características físicas e de textura do produto, assim como, sua estabilidade química. Ela pode ser expressa pelo teor de água ou pela atividade de água (BAPTESTINI, 2013).

O teor de água se refere à quantidade de água que contém o produto. É um indicativo no controle da taxa de deterioração dos alimentos, mas não é suficiente porque não prediz quanto sua estabilidade. A atividade de água é o melhor indicativo. Ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e conseqüentemente sua disponibilidade para agir como um solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (FELLOWS, 2006).

Alimentos desidratados tendem a ganhar umidade do ambiente de estocagem, alterando assim sua atividade de água, até que o equilíbrio seja novamente restituído. As alterações observadas em alimentos em pó são: aglomeração, alterações na textura, mudança de cor e até crescimento microbiano, sendo que tais transformações tendem a levar à rejeição do produto (MEDEIROS e LANNES, 2010). Para melhor entendimento e controle dos fatores que afetam a estabilidade dos alimentos existe uma ferramenta conhecida como curva de equilíbrio higroscópico ou isoterma de sorção.

As isotermas de sorção são curvas que relacionam o teor de água de um produto e a umidade relativa de equilíbrio, para uma dada temperatura. De acordo com Damodaran et al. (2010) as informações derivadas delas são úteis para estudar e controlar processos de conservação e desidratação, pois a facilidade ou dificuldade para a remoção de água estão relacionadas à atividade de água; para formular misturas de alimentos de modo a evitar a transferência de umidade entre os ingredientes; para determinar as propriedades de barreira de umidade necessárias ao material de embalagem necessário à proteção de um sistema em particular; para determinar o conteúdo de umidade que reduzirá o crescimento de microrganismos de interesse em um sistema e, para prever a estabilidade física e química dos alimentos em função de mudanças em seu conteúdo de água. Além disso, por meio das isotermas de equilíbrio higroscópico pode-se determinar o requerimento de energia necessário ao processo de secagem, representado pelos valores do calor isostérico de sorção (Wang e Brennan, 1991).

A maioria das isotermas de sorção de água dos alimentos apresenta forma sigmoide, com pequenas variações conforme a estrutura física, a composição química, a temperatura e a

capacidade de retenção de água do alimento. Elas podem ser divididas em três regiões, onde cada uma representa o mecanismo de sorção diferente (Figura 2).

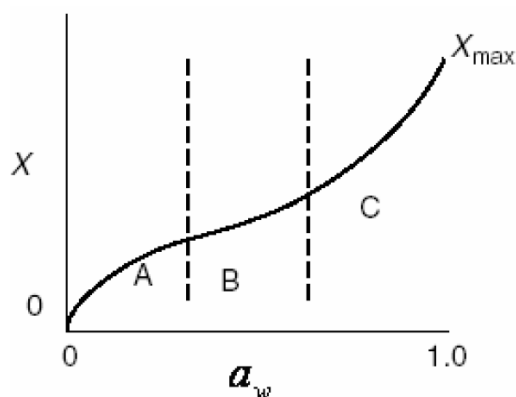


Figura 2: Representação de uma isoterma de sorção com as três regiões.

Fonte: MUJUMDAR, 2006 citado por PIAIA, 2009.

Na região A, a água está altamente ligada a sítios individuais e não está disponível para reações. Nesta região, está contida a água associada à adsorção da primeira camada de vapor d'água na superfície do material adsorvente (monocamada). A energia de ligação depende da superfície do material, de sua estrutura e de seus constituintes químicos, além das propriedades físicas e químicas da água. Situa-se numa faixa de atividade de água de 0 e 0,35 (PIAIA, 2009).

Região B, a água encontra-se mais fracamente ligada. Representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada e compreende a uma faixa de 0,35 e 0,60 de atividade de água. Esta água pode ser solvente para moléculas de baixo peso molecular e para algumas reações bioquímicas. A quantidade de água presente nesta região não congela no ponto de congelamento habitual (AL-MUHTASEB et al., 2002).

Região C, a água está presente em grandes capilares. Representa a região de condensação capilar, onde a umidade condensa nos poros do material, seguida pela dissolução de componentes solúveis presentes. Nessa região, a água encontra-se mais fracamente ligada e mais móvel, possuindo a mesma entalpia de vaporização da água pura. Essa é congelável e encontra-se disponível como solvente permitindo o desenvolvimento de micro-organismos e reações químicas e enzimáticas (RIBEIRO e SERAVALLI, 2008).

É também pelas curvas de sorção que se pode inferir sobre a influência da atividade de água na velocidade de crescimento de micro-organismos, na velocidade de reação de oxidação de lipídios, reação de Maillard, reação enzimática e outras, como observado na Figura 3.

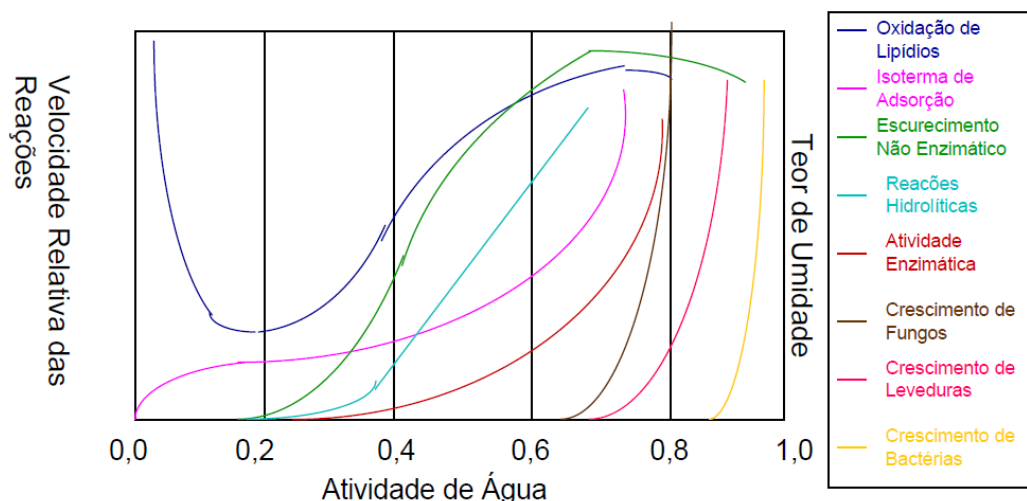


Figura 3: Velocidade relativa de reações em função da atividade de água.
 Fonte: VAN DEN BERG e BRUIN, 1981; modificada por DITCHFIELD, 2000.

De acordo com a Figura 3 observa-se que os alimentos com elevada atividade de água estão mais susceptíveis a degradações, pois é nessa zona em que há maior crescimento de fungos e bactérias, assim como maior taxa de escurecimento não enzimático e atividades enzimáticas. Entretanto, verifica-se maior taxa de oxidação lipídica para valores reduzidos de atividade de água.

Para valores de atividade de água acima de 0,6 inicia-se o crescimento de microorganismos nos alimentos. Estes alteram de tal forma os alimentos que os deixam de ser aceitáveis pelos consumidores. Como por exemplo, o leite azedo, devido bactérias que produzem ácidos durante o seu crescimento. Ou ainda, em peixe, frutas, carne, pães e outros alimentos na qual os microorganismos produzem substâncias que dão origem a cheiros desagradáveis e a alterações de cor que associamos aos produtos estragados.

O teor de lipídios em frutas e vegetais é baixo (0,1-0,9%), sendo constituído principalmente de lipídios polares (fosfolipídios e glicolipídios), e o processo de oxidação é amenizado pelo elevado teor de água, em razão da proteção dada pelas proteínas hidratadas, que impedem o acesso do oxigênio, e da hidratação de íons metálicos, que são insolúveis na fração lipídica (ARAÚJO, 2011).

Durante a secagem, quando a atividade da água é menor que 0,1 a oxidação é acelerada, em virtude da remoção da água de hidratação dos metais, da formação de radicais livres e do acesso físico facilitado do oxigênio nos micros capilares do alimento. O aumento da atividade de água para 0,3 retarda a oxidação de lipídios. Esse efeito protetor da pequena quantidade de água está relacionado à redução da atividade de catalisadores metálicos, devido ao amortecimento de radicais livres, impedindo o acesso do oxigênio ao lipídio. Em valores elevados de atividade de água, 0,55-0,85, a velocidade da oxidação aumenta novamente, provavelmente em razão do aumento da mobilidade de catalisadores e do oxigênio (Figura 3) (ARAÚJO, 2011).

As enzimas são os catalisadores das reações que ocorrem nos sistemas biológicos. Elas têm eficiência catalítica extraordinária, em geral muito maior que aquela dos catalisadores sintéticos. Tem um alto grau de especificidade por seus substratos e aceleram reações químicas específicas (LEHNINGER et al., 1995).

Uma das formas de reduzir as reações enzimáticas é diminuir a atividade de água (Figura 3). Segundo Halling (1990) citado por Lima e Angnes (1999), a atividade enzimática ótima está relacionada com a atividade de água. Este mesmo autor propôs que a atividade termodinâmica da água é um parâmetro que deve ser usado para quantificar o nível de água associado com a enzima. A água é requerida, unicamente, para a função catalítica das enzimas em solventes orgânicos, contribuindo para a formação de todas as ligações não covalentes e pontes de hidrogênio da estrutura proteica.

A reação de Maillard é um tipo de reação de escurecimento não enzimático. É uma reação que envolve aldeído (açúcar redutor) e grupos amina de aminoácidos, peptídeos e proteínas em seu estágio inicial, seguida de várias etapas, culminando com a formação do pigmento escuro. É a principal causa do escurecimento desenvolvido durante o aquecimento e armazenamento prolongado do produto (ARAÚJO, 2011).

Segundo Labuza et al. (1970) citado por Maltini et al. (2003), a taxa da reação de Maillard é baixa ou mesmo nula em valores para atividade de água baixa porque há resistência a difusão, o que diminui a mobilidade dos reagentes e produtos da reação. A difusão e a solubilidade dos reagentes ocorrem apenas em um teor de água acima da monocamada embora, a mudança da cor dos alimentos possa ocorrer nos baixos valores de atividade de água. Já para valores elevados de atividade de água, a taxa é alta devido ao efeito de diluição dos reagentes.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo geral

Estudar e caracterizar o processo de produção de graviola em pó pelo método de secagem em leito de espuma através da escolha do melhor emulsificante e concentração, bem como determinar as propriedades físico-químicas do produto in natura, da espuma e do pó formado.

3.2. Objetivos específicos

1. Estudar e caracterizar espumas feitas com a adição de albumina, emustab[®], superliga neutra[®] e maltodextrina nas concentrações de 0,0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% em massa, visando a secagem em leito de espuma;
2. Determinar qual o melhor emulsificante e concentração adequado para a obtenção de espuma destinada a secagem em leito de espuma;
3. Estudar e modelar a cinética de secagem da espuma de graviola com o emulsificante e concentração mais adequado;
4. Propor um modelo para determinar o ponto de transição entre o período de taxa de secagem constante e o de taxa de secagem decrescente;
5. Determinar o coeficiente de difusão efetiva e a energia de ativação da secagem de espuma de graviola;
6. Determinar e modelar as isotermas de sorção do pó de graviola em diversas condições de temperaturas e umidades relativas do ar;
7. Determinar as propriedades termodinâmicas da sorção de água, em função do teor de água de equilíbrio;
8. Determinar as propriedades físico-químicas do pó de graviola ao final da secagem.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação da Qualidade pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), na Planta Piloto e no Laboratório de Processamento de Frutas e Hortaliças, todos localizados no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais e no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais.

Para melhor compreensão do trabalho, a seguir é apresentado um fluxograma geral do processo de obtenção de pó de graviola através da secagem em leito de espuma (Figura 4).

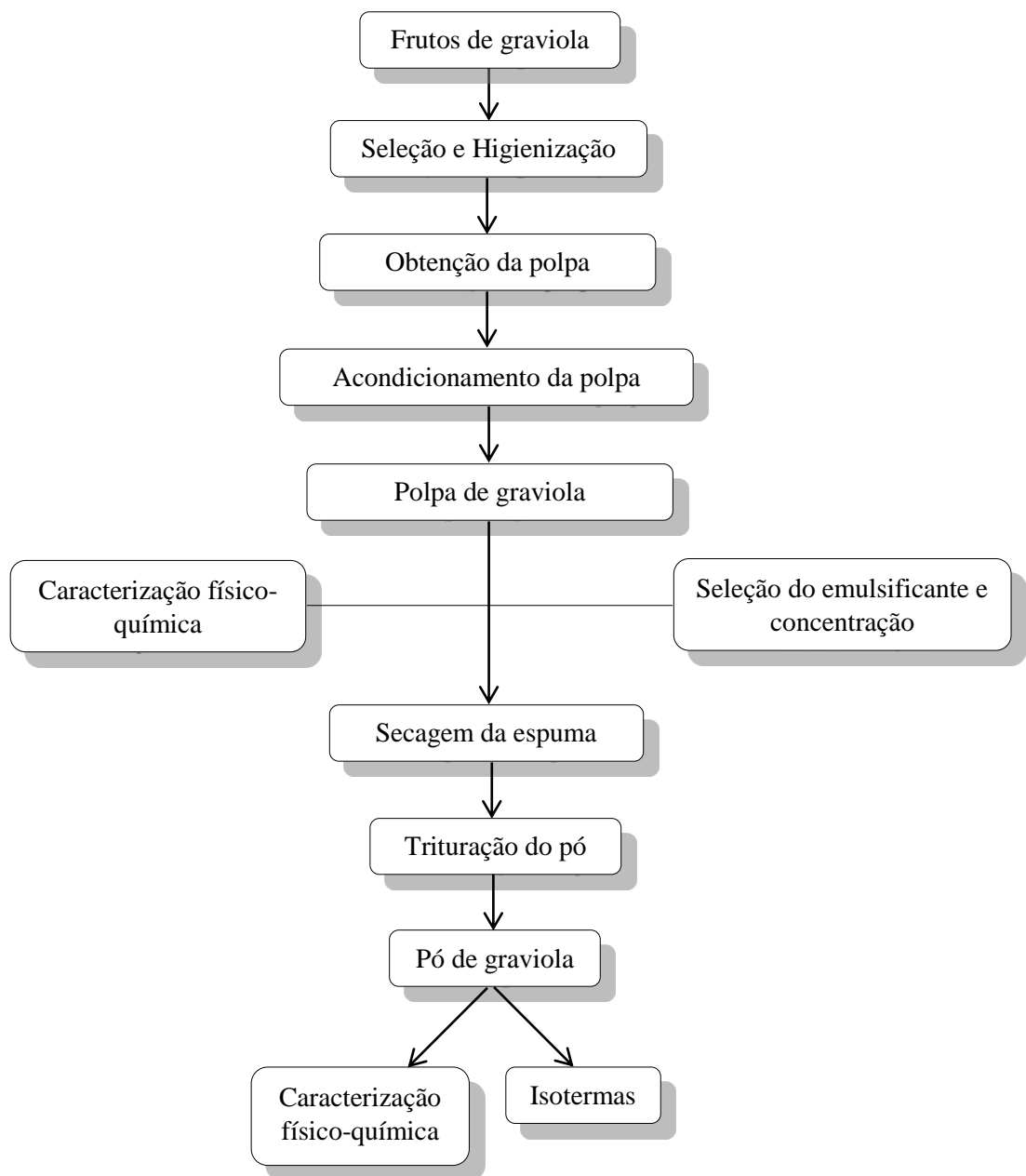


Figura 4: Fluxograma geral do processo de obtenção de pó de graviola através da secagem em leito de espuma.

4.1. Matéria-Prima.

Foram utilizados frutos de graviola (*Annona muricata* L.) provenientes da região sul da Bahia, município Santa Cruz Cabralia, que foram transportados até a Central de Abastecimento de Minas Gerais (CEASA MINAS), localizada em Contagem. Em seguida os frutos foram transportados até Viçosa.

Os frutos foram colocados em câmara tipo BOD, marca Fanem, modelo 347 CD, na temperatura de 20 °C até que todos os frutos a serem despolpados estivessem maduros, ou seja, quando pressionados suavemente pelo dedo conseguisse perceber que estes estavam moles e as espículas se quebravam facilmente.

Quando maduros os frutos foram levados para a Planta Piloto de Processamento de Frutas e Hortaliças. Neste local, os frutos foram higienizados em solução de água e cloro na proporção de 100 L de água para 10 mL de cloro por 10 min. Depois foram submetidos a uma seleção prévia, eliminando-se frutos com danos visíveis e doenças, com a finalidade de se obter um produto homogêneo.

Após a seleção, os frutos foram descascados e despolpados em despolpadora industrial de um estágio, Bonina 0.25 df. A polpa obtida foi acondicionada em garrafas tipo PET, também higienizadas com água e cloro na mesma proporção da higienização dos frutos, e armazenada em freezer a -18 °C para posterior utilização.

4.2. Caracterização das propriedades físico-químicas da polpa de graviola.

4.2.1. Teor de água.

O teor de água foi obtido por gravimetria utilizando uma estufa da marca Ghehaka modelo 400/3ND, a 105 °C por 24 h. Para a pesagem utilizou-se uma balança analítica da marca Marte, modelo AY220, com precisão de 0,001 g e resolução de 0,0001 g.

4.2.2. Atividade de água (A_w).

A determinação da atividade de água das amostras foi feita utilizando o aparelho Aqualab 4 TE da Decagon Devices, na temperatura de 25 °C, que fornece leituras de atividade de água no intervalo de 0,050 a 1,000, com precisão de $\pm 0,003$ e resolução de 0,0001.

4.2.3. Acidez total titulável (ATT).

A acidez total titulável foi determinada em porcentagem de ácido cítrico, pela titulação de alíquota de 10 mL de amostra em 90 mL de água destilada com solução 0,1 N de NaOH, em presença de fenolftaleína (AOAC, 2002).

4.2.4. pH.

O valor do pH foi determinado diretamente nas amostras por potenciometria, utilizando-se um pHmetro digital da marca Hanna Brasil, modelo 21, conforme AOAC (2002).

4.2.5. Teor de sólidos solúveis totais (SST).

O teor de sólidos solúveis totais foi determinado pela leitura direta com o auxílio de um refratômetro portátil, marca Nova, modelo 113, e os resultados foram expressos em °Brix, conforme AOAC (2002).

4.2.6. Determinação do teor de açúcares solúveis totais e redutores.

Cerca de 5 g de amostra foram colocadas em balão volumétrico de 50 mL e o volume completado. A amostra diluída foi colocada em tubos de ensaio e centrifugada a 14000 rpm por 15 min. Do sobrenadante foram pipetadas alíquotas de 2 e 1 mL para a determinação do teor de açúcares solúveis totais e redutores, respectivamente.

a) Quantificação dos açúcares solúveis totais

Ao volume pipetado de 2 mL foram adicionados uma alíquota de 2 mL de HCl 2 N. Em seguida, as amostras foram levadas para aquecer em banho-maria por 10 min. Após a remoção dos tubos de ensaio do banho-maria, esses foram colocados para resfriar em banho de gelo até atingir a temperatura ambiente. Logo depois, foram adicionados uma alíquota de 2 mL de NaOH 2 N. Retirou-se uma alíquota de 1 mL desse volume e adicionou-se uma alíquota de 1 mL de reagente SN-I (Reagente de Somogyi-Nelson I). Em seguida, as amostras foram levadas para aquecer em banho-maria por 5 min. Após a remoção dos tubos de ensaio do banho-maria, esses foram colocados para resfriar em banho de gelo até atingir a temperatura ambiente. Logo depois, foram adicionados uma alíquota de 16 mL de tartarato de sódio e feita as leituras da absorbância em espectrofotômetro a 540 nm. Os valores obtidos foram comparados com a curva padrão de sacarose.

b) Quantificação dos açúcares redutores

Ao volume pipetado de 1 mL foram adicionados uma alíquota de 1 mL de reagente SN-I (Reagente de Somogyi-Nelson I). Em seguida, as amostras foram levadas para aquecer em banho-maria por 5 min. Após a remoção dos tubos de ensaio do banho-maria, esses foram colocados para resfriar em banho de gelo até atingir a temperatura ambiente. Logo depois, foram adicionados uma alíquota de 16 mL de tartarato de sódio e feita as leituras da absorbância em espectrofotômetro a 540 nm. Os valores obtidos foram comparados com a curva padrão de sacarose.

A partir dos valores de absorbância, procederam-se os cálculos com as devidas correções na diluição utilizada, sendo o resultado expresso em %.

4.2.7. Cor.

As amostras foram submetidas à leitura em um colorímetro tristímulo (MiniScan XE Plus 45/0-L, HunterLab, Reston, Estados Unidos), para leitura direta de reflectância das coordenadas L^* , a^* e b^* , empregando a escala HunterLab e utilizando o iluminante 10°/D65.

A partir dos valores de L^* , a^* e b^* , foram calculados os índices colorimétricos: o croma (C^*) (Equação 1), e o ângulo hue (h^*) (Equação 2). A diferença total de cor (ΔE) (Equação 3) foi calculada levando-se em consideração as condições iniciais.

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (3)$$

Também foi calculado o índice de escurecimento (BI) (Equação 4). Esta equação é utilizada em experimentos na área de alimentos processados (PINELI et al., 2005; SARICOBAN e YILMAZ, 2010) para a avaliação indireta da ação das enzimas que provocam a mudança de cor durante o processamento e armazenamento.

$$BI = \frac{100(x - 0,31)}{0,172} \quad (4)$$

em que:

$$x = \frac{a^* + 1,75L^*}{5,645L^* + a^* - 3,012b^*} \quad (5)$$

4.2.8. Massa específica aparente.

Para a determinação da massa específica aparente foi utilizado picnômetro de 30 mL, devidamente aferido com água destilada a 25 °C. A amostra foi colocada no picnômetro até o volume desejado e este pesado para que se tenha a massa por volume (kg m^{-3}) (Figura 5).



Figura 5: Picnômetro utilizado para a determinação da massa específica aparente.

4.3. Processo de formação e caracterização da espuma.

Para a formação das espumas, foram utilizados os seguintes emulsificantes: albumina (produto à base da proteína do ovo), emustab® (produto à base de monoglicerídeos destilados,

monoestearato de sorbitana e polisorbato 60) (SOARES, et al., 2001), superliga® (produto à base de sacarose e dos espessantes, carboximetil-celulose e goma guar) (SOARES, et al., 2001) e maltodextrina (produto à base de amido de milho). Esses emulsificantes foram usados nas proporções de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10% em massa.

Foram adicionados à polpa de graviola os emulsificantes na concentração desejada e essa mistura foi submetida à agitação, em uma batedeira doméstica da marca Philips Walita, modelo RI7110 – 300 W na velocidade 3, por 15 min para a obtenção da espuma.

A espuma formada da polpa de graviola (Figura 6) foi submetida às seguintes análises para sua caracterização:



Figura 6: Espuma de graviola.

4.3.1. Determinação do teor de água, A_w , ATT, pH, SST, açúcares totais e redutores, cor e massa específica aparente.

As análises foram realizadas conforme descrito no item 4.2.

4.4. Seleção do emulsificante e da concentração para a produção de espuma de graviola.

Para a escolha do melhor emulsificante e concentração foram considerados os seguintes parâmetros: massa específica aparente, estabilidade e expansão da espuma. Foi escolhida a formulação que apresentou melhores resultados em relação aos parâmetros escolhidos. Entre uma formulação e outra, não havendo diferenças destes parâmetros, foi selecionada a amostra com a menor concentração do agente emulsificante.

4.4.1. Determinação da massa específica aparente.

Realizada seguindo a técnica descrita no item 4.2.

4.4.2. Determinação da expansão.

Para determinar a porcentagem de expansão das espumas foi empregada a seguinte equação (Equação 6):

$$EX(\%) = \frac{\frac{1}{\rho_{\text{espuma}}} - \frac{1}{\rho_{\text{polpa}}}}{\frac{1}{\rho_{\text{espuma}}}} \times 100 \quad (6)$$

em que:

EX: expansão da espuma, %

ρ_{espuma} : massa específica da espuma, kg m^{-3}

ρ_{polpa} : massa específica da polpa, kg m^{-3} .

4.4.3. Determinação da estabilidade.

A estabilidade da espuma foi determinada adaptando-se a técnica descrita por Barmore (1934), em que foi montado um sistema constituído de uma proveta, com um funil acoplado e uma peneira, onde 10 g da espuma foram colocados na peneira suportada pelo funil. Esse sistema foi deixado em repouso por 2 h sendo o volume de filtrado lido a cada 15 min, avaliando assim a porcentagem de espuma coalescida (Figura 7).



Figura 7: Aparato para a determinação da estabilidade.

As análises de caracterização das propriedades físico-químicas da polpa in natura e da espuma de graviola assim como, as de seleção do emulsificante e da concentração foram realizadas em ambiente a 20 °C.

4.4.4. Análise estatística.

O experimento foi montado segundo o esquema fatorial (4 emulsificantes x 5 concentrações), no delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Havendo diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para analisar o fator quantitativo, realizou-se análise de regressão e os modelos foram escolhidos baseando-se no coeficiente de determinação e na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” e adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

4.5. Secagem em leito de espuma.

A espuma formada foi espalhada sobre bandejas formando uma camada fina de cerca de 5,0 mm de espessura. Em seguida, a espuma foi levada para a secagem em estufa de circulação forçada de ar na qual as temperaturas e a velocidade média do ar foram de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, 5,6 m s⁻¹, respectivamente (Figura 8). Durante o processo de secagem, as amostras foram pesadas periodicamente, até que a variação da massa, entre três pesagens consecutivas, fossem igual ou inferior a 0,01 g



Figura 8: Bandejas com espuma de graviola na estufa.

Para a determinação do binômio teor de água crítico e tempo crítico utilizou-se a Equação 7, adaptada de Stupa et al. (2003) e Reis et al. (2013), que descreve o período de taxa constante e período de taxa decrescente, separados pelo tempo crítico.

$$U_t = [U_0 + (n \times t)] \times (t < t_c) + \{U_c \times \exp[k \times (t - t_c)]\} \times (t \geq t_c) \quad (7)$$

em que:

U_c : teor de água crítico, kg_a kg_{ms}⁻¹

U_t : teor de água num tempo t, kg_a kg_{ms}⁻¹

n: taxa de secagem no período constante, min^{-1}

U_0 : teor de água inicial, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$

k: taxa de secagem no período decrescente, min^{-1}

t_c : tempo crítico, min.

A razão de umidade (RU) foi determinada de acordo com a Equação 8.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} \quad (8)$$

em que:

U_e : teor de água no equilíbrio, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$.

Aos dados experimentais da secagem da espuma de graviola foram ajustados modelos matemáticos frequentemente usados para descrever o fenômeno da secagem (Tabela 2).

Tabela 2: Modelos matemáticos usados para modelagem da secagem da espuma de graviola

Designação do modelo	Modelo
Aproximação da difusão	$RU = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$ (9)
Exponencial de dois termos	$RU = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$ (10)
Henderson e Pabis	$RU = a \exp(-kt)$ (11)
Logaritmo	$RU = a \exp(-kt) + b$ (12)
Midili	$RU = a \exp(-kt^n) + bt$ (13)
Newton	$RU = \exp(-kt)$ (14)
Page	$RU = \exp(-kt^n)$ (15)

em que:

t: tempo de secagem, min

k: constante de secagem, min^{-1}

a, b, c, n: coeficientes dos modelos, adimensionais.

4.5.1. Determinação do Coeficiente de Difusão Efetiva (D_{ef}).

O coeficiente de difusão efetiva foi obtido por meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 16. Esta equação é a solução analítica para a Segunda Lei de Fick, que leva em consideração a forma geométrica plana, a condição de contorno do teor de água conhecido na superfície do produto e que o coeficiente de difusão efetiva é constante durante o processo de secagem.

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (16)$$

em que:

L: espessura do produto, m

D_{ef} : coeficiente de difusão efetiva, $m^2 s^{-1}$

n: número de termos da equação.

A solução analítica desta equação apresenta-se na forma de uma série infinita. Portanto, o número finito de termos (n) no truncamento determina a precisão dos resultados. Esse número foi quatro (n=4), uma vez para maiores valores de (n) o coeficiente de difusão efetiva não variou.

4.5.2. Influência da temperatura.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetiva utilizou-se a relação de Arrhenius, Equação 17.

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (17)$$

em que:

D_0 : fator pré-exponencial

E_a : energia de ativação, $J mol^{-1}$

R: constante universal dos gases, $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$

T_a : temperatura absoluta, K.

4.5.3. Análise estatística.

O experimento foi montado segundo o delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições.

Os dados experimentais da secagem da espuma de graviola foram submetidos à análise de regressão não-linear e à seleção do modelo adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas.

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas a magnitude do coeficiente de determinação, do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE), Equações 18 e 19 respectivamente e a distribuição de resíduos (DR).

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (18) \quad SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

Y_i : valor observado

\hat{Y}_i : valor estimado

n: número de dados observados

GLR: graus de liberdade do resíduo.

4.6. Isotermas de sorção.

Para obtenção do teor de água de equilíbrio das amostras do pó de graviola, pelo processo de sorção, foi utilizado o método estático. Foram utilizadas câmaras tipo BOD, marca Fanem, modelo 347 CD, mantidas nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C e dessecadores com soluções saturadas (Figura 9), preparadas de acordo com técnicas citadas por Greenspan (1977), como apresentado na Tabela 3.

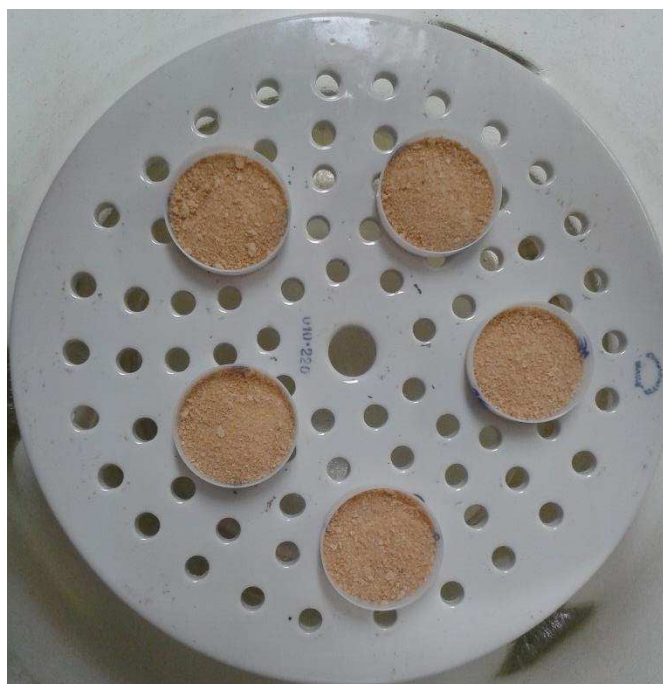


Figura 9: Amostras de pó de graviola para a determinação do teor de água de equilíbrio higroscópico.

Tabela 3: Umidades relativas (%) estabelecidas no interior do dessecador para as soluções saturadas e temperatura da câmara

Composto Químico	Temperatura (°C)				
	10	20	30	40	50
LiCl	11,3	11,3	11,3	11,2	11,1
MgCl ₂ 6H ₂ O	33,5	33,1	32,4	31,6	30,5
NaBr	62,2	59,1	56,0	53,2	50,9
NaCl	75,7	75,5	74,9	74,7	74,4
KCl	86,8	85,1	83,0	82,3	81,2

Para todos os testes, foram utilizadas amostras contendo aproximadamente 4 g de produto em cinco repetições. Durante o processo de sorção, elas foram pesadas periodicamente, até que a

variação da massa, entre três pesagens consecutivas, fossem igual ou inferior a 0,001 g, representando nesse momento o teor de água de equilíbrio higroscópico.

Aos dados observados do teor de água de equilíbrio higroscópico obtidos para cada condição de temperatura e umidade relativa, foram ajustados modelos matemáticos comumente utilizados para descrição dos fenômenos de sorção (Tabela 4).

Tabela 4: Modelos matemáticos para representação das curvas de equilíbrio higroscópico

Designação do modelo	Modelo	
Chung-Pfost	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(A_w)]$	(20)
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (c A_w)]$	(21)
Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)	$U_e = \frac{U_m C K A_w}{(1 - K A_w)(1 - K A_w + C K A_w)}$	(22)
Halsey modificado	$U_e = \left[-\frac{\exp(a + bT)}{\ln A_w} \right]^{\frac{1}{c}}$	(23)
Oswin modificado	$U_e = \frac{(a + bT)}{\left[\frac{(1 - A_w)}{A_w} \right]^{\frac{1}{c}}}$	(24)
Sigma-Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(A_w)]\}$	(25)

em que:

U_m : teor de água da monocamada, % b.s.

A_w : atividade de água, decimal

C e K : parâmetros do modelo de GAB que são relacionados, respectivamente, às propriedades da monocamada e multicamadas, adimensionais

a , b e c : parâmetros de ajuste dos modelos

T : temperatura, °C.

4.6.1. Propriedades termodinâmicas associadas à sorção de água na monocamada

Após a obtenção dos coeficientes do modelo de GAB, os valores de entalpia associados à variação de cada coeficiente com a temperatura, foi calculado por meio da representação gráfica de $\ln(U_m)$, $\ln(C)$ e $\ln(K)$ versus o inverso da temperatura absoluta (T_a^{-1}).

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_1}{RT_a}\right) \quad (26)$$

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_2}{RT_a}\right) \quad (27)$$

$$U = U_{m0} \exp\left(\frac{\Delta H_3}{RT_a}\right) \quad (28)$$

em que:

U_{m0} : fator pré-exponencial, % b.s.

C_0 e K_0 : fatores pré-exponenciais, adimensionais

ΔH_1 , ΔH_2 e ΔH_3 : incrementos de entalpia associadas à variação dos parâmetros do modelo de GAB com a temperatura, kJ kg^{-1} .

4.6.2. Propriedades termodinâmicas da sorção de água.

O calor isostérico de sorção foi calculado pela Equação 29, conhecida como equação de Clausius-Clayperon (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976).

$$\frac{\partial \ln(A_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (29)$$

em que:

Δh_{st} : calor isostérico líquido de sorção ou entalpia diferencial, kJ kg^{-1} .

Integrando a Equação 29 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção seja independente da temperatura, para cada teor de água de equilíbrio, obtém-se a Equação 30 (WANG e BRENNAN, 1991).

$$\ln(A_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right)\frac{1}{T_a} + C_1 \quad (30)$$

em que:

C_1 : constante de integração, adimensional.

O calor isostérico integral de sorção foi obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre, de acordo com a Equação 31:

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L \quad (31)$$

em que:

L : calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1}

Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} .

O calor latente de vaporização da água livre, necessário ao cálculo do calor isostérico integral de sorção, foi obtido pela temperatura média (\bar{T}) na faixa em estudo, em °C, segundo apresentado na Equação 32:

$$L = 2502,2 - 2,39\bar{T} \quad (32)$$

Mudanças na entropia diferencial de sorção foram calculadas pela Equação 33, conhecida como equação de Gibbs-Helmholtz (RIZVI, 1995):

$$\Delta S = \frac{\Delta h_{st} - \Delta G}{T_a} \quad (33)$$

em que:

ΔS : entropia diferencial de sorção, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

ΔG : energia livre de Gibbs, kJ kg^{-1} .

A energia livre de Gibbs foi calculada segundo a Equação 34:

$$\Delta G = \pm RT_a \ln(A_w) \quad (34)$$

O efeito de mudanças na sorção da água sobre a energia livre normalmente também é acompanhado por mudanças nos valores de entalpia e entropia. Assim, substituindo a Equação 34 na 33 e rearranjando, tem-se:

$$\ln(A_w) = \pm \left(\frac{\Delta h_{st}}{RT_a} - \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (35)$$

Os valores de calor isostérico líquido de sorção e os valores de entropia foram calculados pela Equação 35, plotando os valores de atividade de água por T^{-1} para respectivos valores de teor de água de equilíbrio. Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir da equação de melhor ajuste aos dados de teor de água de equilíbrio higroscópico do pó de graviola.

Os valores calculados de entalpia diferencial de sorção (Δh_{st}) e de entropia (ΔS) foram relacionados pela Equação 36 (BERISTAIN et al., 1996).

$$\Delta h_{st} = T_B(\Delta S) + \Delta G_B \quad (36)$$

em que:

T_B : temperatura isocinética, K

ΔG_B : energia livre de Gibbs à temperatura isocinética, kJ kg^{-1} .

A temperatura isocinética representa a temperatura na qual todas as reações em série ocorrem em uma mesma taxa. Se a entalpia e a entropia forem altamente correlacionadas, assume-se que a teoria da compensação pode ser válida para a sorção (BERISTAIN et al., 1996). Para

confirmar a existência da compensação, a temperatura isocinética foi comparada com a média harmônica da temperatura, definida de acordo com a Equação 37 (KRUG et al., 1976a; 1976b).

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_a} \right)} \quad (37)$$

em que:

T_{hm} : média harmônica da temperatura, K

n: número de temperaturas utilizadas.

De acordo com Krug et al. (1976a; 1976b), a compensação química linear só existe se a temperatura isocinética (T_B) for diferente da média harmônica da temperatura (T_{hm}).

Um intervalo de confiança aproximado, $(1-\alpha)$ 100%, para a temperatura isocinética pode ser calculado pela seguinte equação:

$$T_B = \hat{T}_B \pm t \left(m-2, \frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\text{Var}(T_B)} \quad (38)$$

em que:

$$\hat{T}_B = \frac{\sum (\Delta H - \Delta \bar{H})(\Delta S - \Delta \bar{S})}{\sum (\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (39)$$

e

$$\text{Var}(T_B) = \frac{\sum (\Delta H - \Delta \bar{G}_B - \hat{T}_B \Delta S)^2}{(m-2)(\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (40)$$

em que:

m: número de pares de dados de entalpia e entropia

$\Delta \bar{H}$: entalpia média, kJ kg⁻¹

$\Delta \bar{S}$: entropia média, kJ kg⁻¹ K⁻¹.

4.7. Propriedades físico-químicas do pó de graviola.

Logo após a secagem o produto seco foi retirado da bandeja, desfragmentado e colocado em sacos plásticos de polietileno de baixa densidade. Estes sacos foram colocados dentro de potes de mesmo material e armazenados em câmara tipo BOD, marca Fanem, modelo 347 CD, a temperatura de 20 °C para a realização das análises físico-químicas do pó (Figura 10).



Figura 10: Pó de graviola obtido pelo método de secagem em leito de espuma.

As determinações do teor de água, A_w , ATT, pH, SST, açúcares totais e redutores e cor foram realizadas conforme descrito no item 4.2.

4.7.1. Massa específica unitária.

A massa específica unitária ou real (ρ_u) foi determinada com o uso de um picnômetro a hélio, marca Quantachrome Instruments (Figura 11), seguido da utilizando das Equações 41 e 42:



Figura 11: Picnômetro a hélio.

$$V_s = V_e - V_a \left(\frac{P_1}{P_2} - 1 \right) \quad (41)$$

$$\rho_u = \frac{m_s}{V_s} \quad (42)$$

em que:

P_1 : pressão inicial, psi

P_2 : pressão final, psi

V_a : volume da câmara da amostra, cm^3

V_s : volume do sólido, cm^3

V_e : volume da câmara de expansão, cm^3

ρ_u : massa específica unitária, kg m^{-3}

m_s : massa de sólidos, g.

4.7.2. Massa específica aparente.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi determinada utilizando-se uma balança de peso hectolitro, marca Gehaka.

4.7.3. Porosidade.

A porosidade (ε) foi calculada indiretamente de acordo com a Equação 43 (MOHSENIN, 1986), tradicionalmente utilizada para produtos agrícolas.

$$\varepsilon = 100 \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) \quad (43)$$

em que:

ε : porosidade, %

ρ_{ap} : massa específica aparente, kg m^{-3} .

4.7.4. Ângulo de repouso.

Para determinar o ângulo de repouso foi utilizado um equipamento (Figura 12), que consiste de um cilindro provido de uma abertura no fundo sobre o qual se eleva uma plataforma circular, de diâmetro conhecido. O cilindro, com a abertura no fundo fechada, foi preenchido com o pó. Em seguida, o pó é removido pela abertura no fundo, permanecendo um cone de pó sobre a plataforma circular. O ângulo de repouso foi calculado por meio da seguinte equação:

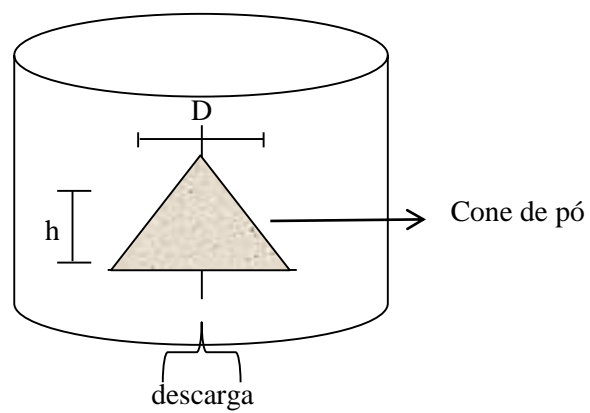


Figura 12: Equipamento para a determinação do ângulo de repouso e representação das dimensões.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2h}{D}\right) \quad (44)$$

em que:

α : ângulo de repouso, em graus

D: diâmetro da plataforma circular, mm

h: altura do cone de pó, mm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Características físico-químicas da polpa e da espuma de graviola.

Os resultados da caracterização físico-químicas dos emulsificantes utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 5. Observa-se que o emustab[®] tem o maior teor de água, a albumina o maior teor de SST, a superliga neutra a maior ATT e a maltodextrina o menor pH.

Tabela 5: Caracterização físico-química dos emulsificantes.

Características	Emulsificantes			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
Teor de água (kg _a kg _{ms} ⁻¹)	0,090	3,471	0,062	0,028
SST (°Brix) ¹	10,0	1,5	8,8	8,0
ATT (% ácido cítrico) ¹	0,9	0,3	0,25	1,0
pH ¹	9,87	8,82	5,35	6,73

Fonte: PINTO (2009)¹

Na Tabela 6 estão apresentadas as médias do teor de água e da atividade de água da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Analisando a Tabela 6 observa-se que houve diferença significativa do teor de água e da atividade de água entre os emulsificantes a partir da concentração 2,5 e 7,5%, respectivamente. Além disso, o emulsificante emustab[®] proporcionou maiores valores de teor de água para a espuma de graviola. Isso ocorreu porque esse emulsificante tem maior teor de água do que os outros, como constatado na Tabela 5.

Tabela 6: Médias do teor de água e da atividade de água da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Teor de água (kg _a kg _{ms} ⁻¹)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	7,3516a	7,3516a	7,3516a	7,3516a
2,5	5,4734c	7,1930a	5,9019b	6,1372b
5,0	4,2862c	7,1402a	5,0802b	5,2863b
7,5	3,9045c	7,0393a	4,5185b	4,4712b
10,0	3,5127c	6,8718a	3,5409c	3,8841b

Atividade de água				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	0,9893a	0,9893a	0,9893a	0,9893a
2,5	0,9868a	0,9876a	0,9861a	0,9886a
5,0	0,9850a	0,9862a	0,9857a	0,9875a
7,5	0,9814b	0,9870a	0,9869a	0,9842ab
10,0	0,9819b	0,9864a	0,9865a	0,9848ab

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O comportamento do teor de água e da atividade de água da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa estão apresentados nas Figuras 13A e 13B, respectivamente. Observa-se a tendência decrescente do teor de água (Figura 13A) em função da concentração para todos os emulsificantes. Para a atividade de água (Figura 13B), os emulsificantes albumina e superliga neutra[®] proporcionaram a mesma tendência do teor de água. O mesmo foi constatado por Pinto (2009) e Soares (2009) na obtenção de espuma de jenipapo e araçá-boi, respectivamente, com o objetivo de utilização da técnica de secagem em leito de espuma. Ademais, verifica-se que para a albumina essas duas características físico-químicas apresentaram os menores valores.

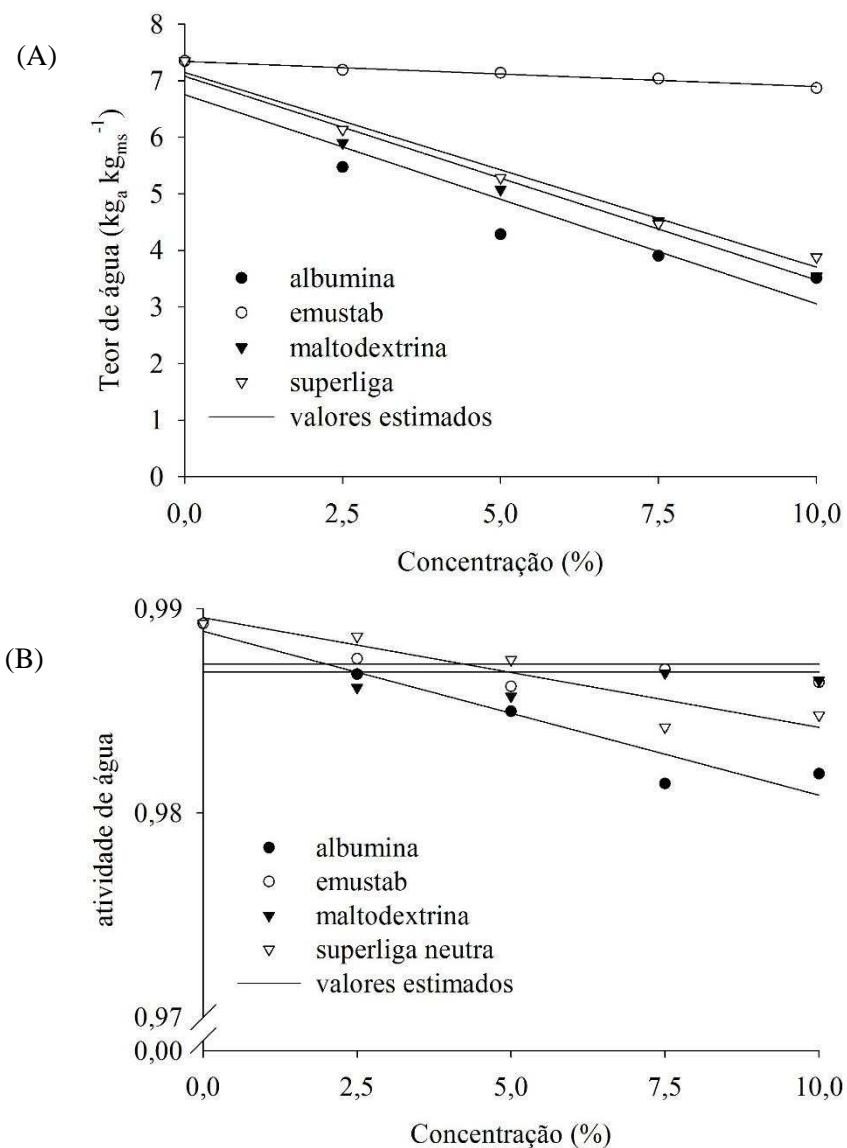


Figura 13: Teor de água (A) e atividade de água (B) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Na Tabela 7 estão apresentadas as equações ajustadas aos dados experimentais do teor de água e da atividade de água da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação. Observa-se um bom ajuste para as equações uma vez que essas apresentaram coeficiente de determinação superior a 86,70% e significâncias dos parâmetros dos modelos.

Tabela 7: Equações ajustadas aos dados experimentais do teor de água e da atividade de água da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$\hat{T}A = -0,3699^* \times C + 6,7550^*$	88,77
	$\hat{a}w = -0,0008^* \times C + 0,9889^*$	92,37
emustab [®]	$\hat{T}A = -0,0445^* \times C + 7,3419^*$	97,22
	$\hat{a}w = 0,9872$	-
maltodextrina	$\hat{T}A = -0,3602^* \times C + 7,0796^*$	97,43
	$\hat{a}w = 0,9869$	-
superliga neutra [®]	$\hat{T}A = -0,3440^* \times C + 7,1463^*$	98,34
	$\hat{a}w = -0,0005^{**} \times C + 0,9896^*$	86,70

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

As médias da ATT e do pH da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8: Médias da ATT e do pH da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

ATT (% ácido cítrico)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	0,17a	0,17a	0,17a	0,17a
2,5	0,13b	0,09c	0,19a	0,18a
5,0	0,07c	0,08c	0,21a	0,17b
7,5	0,05d	0,08c	0,11b	0,20a
10,0	0,04d	0,08c	0,10b	0,17a

pH				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	3,93a	3,93a	3,93a	3,93a
2,5	3,83a	3,72b	3,80a	3,55c
5,0	3,60b	3,73a	3,73a	3,64b
7,5	3,89b	3,57c	3,59c	3,97a
10,0	4,03a	3,56c	3,53c	3,90b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A acidez total titulável conforme Brasil (2005b) fundamenta-se na reação de neutralização dos ácidos com solução padronizada de álcali, até o ponto de equivalência ou potenciômetro na qual a solução atinge pH = 8,2. Esta foi maior quando superliga neutra[®] foi adicionada a polpa para obtenção da espuma, exceto na concentração de 5,0%. Isso ocorre porque esse emulsificante tem maior acidez entre os demais. Ademais, os valores encontrados neste trabalho são ligeiramente inferiores ao reportado por Marcellini et al. (2003), Ojeda de Rodriguez et al. (2007) e Canuto et al. (2010).

Os valores de pH variaram entre os emulsificantes para cada concentração, entretanto estes estão próximos aos reportados pelos Cavalcanti Mata et al. (2005) e Cardozo et al. (2012). Além disso, estes são baixos indicando que a polpa e as espumas são ácidas.

Nota-se, pela Figura 14A, diminuição da ATT com o aumento da concentração dos emulsificantes, sendo esta menor para a albumina a partir da concentração de 5,0%. O mesmo foi verificado por Pinto (2009) e Soares (2009) na obtenção de espuma de jenipapo e araçá-boi, respectivamente. O pH apresentou a mesma tendência da ATT apenas para os emulsificantes emustab[®] e maltodextrina (Figura 14B). Para o emulsificante albumina, Soares (2009), Pinto (2009) e Barreto (2011) também verificaram acréscimo no pH das espumas com o aumento da

concentração destes. Isso ocorre, provavelmente, devido ao valor do pH da albumina ser maior que os dos outros demais emulsificantes (Tabela 5).

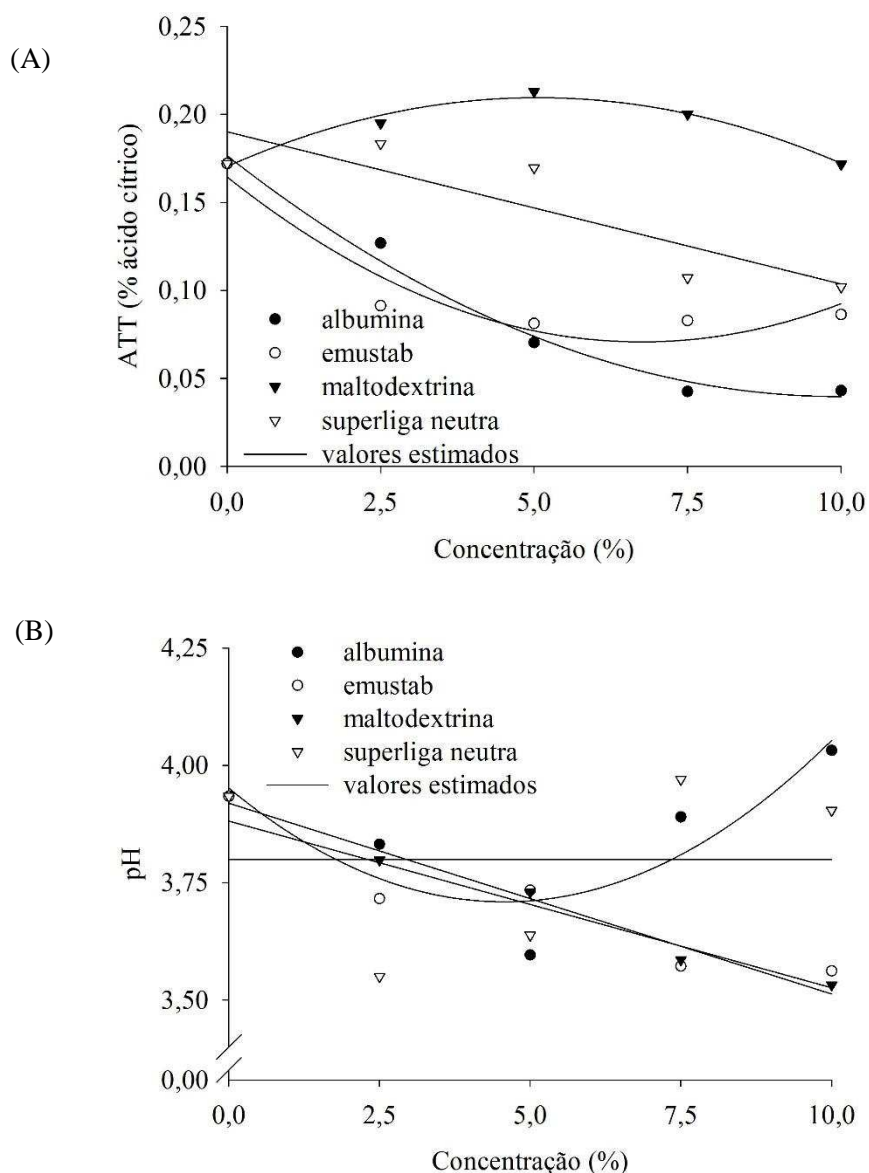


Figura 14: ATT (A) e pH (B) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa

As equações ajustadas aos dados experimentais da ATT e do pH da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 9, na qual certifica-se bom ajuste das mesmas por apresentarem coeficiente de determinação superior a 75,64% e significância dos coeficientes dos modelos.

Tabela 9: Equações ajustadas aos dados experimentais da ATT e do pH da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$\hat{A}TT = 0,001^{***} \times C^2 - 0,02^{**} \times C + 0,17^*$	98,60
	$\hat{p}H = 0,01 \times C^2 - 0,11 \times C + 3,95^*$	75,64
emustab [®]	$\hat{A}TT = 0,002^{***} \times C^2 - 0,03^{***} \times C + 0,16^*$	91,63
	$\hat{p}H = -0,04^{**} \times C + 3,88^*$	86,15
maltodextrina	$\hat{A}TT = -0,001^{**} \times C^2 + 0,01^{**} \times C + 0,17^*$	97,30
	$\hat{p}H = -0,04^* \times C + 3,92^*$	98,12
superliga neutra [®]	$\hat{A}TT = -0,008^{**} \times C + 0,19^*$	77,00
	$\hat{p}H = 3,79$	-

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

As médias dos SST, açúcares solúveis totais e redutores da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Médias dos SST, açúcares solúveis totais e redutores da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

SST (°Brix)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	13,0a	13,0a	13,0a	13,0a
2,5	16,2a	14,0b	16,0a	16,0a
5,0	19,0b	15,0c	20,0a	19,0b
7,5	21,2a	14,0d	20,0c	20,8b
10,0	24,0a	14,0b	21,0c	22,0b

Açúcares solúveis totais (% de ácido cítrico)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	17,8091a	17,8091a	17,8091a	17,8091a
2,5	20,3055a	14,2152b	19,2126a	9,9693c
5,0	17,5282b	13,8986c	22,7719a	18,6179b
7,5	13,1832c	15,7798b	20,1862a	13,6255bc
10,0	18,0990b	13,9589c	23,9985a	21,8903a

Açúcares redutores (% de ácido cítrico)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	8,8072a	8,8072a	8,8072a	8,8072a
2,5	7,9633a	5,4734b	5,8482b	6,0734b
5,0	8,8879a	5,9802b	6,1412b	4,8581c
7,5	3,6530c	6,3696a	6,3191a	5,1669b
10,0	5,9408a	5,9711a	5,9328a	4,6816b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Sacramento et al. (2003) o teor de sólidos solúveis nos frutos de anonáceas é elevado e constitui-se principalmente de açúcares solúveis. O valor deste na concentração 0,0% corrobora com os reportados pelos mesmos autores, Canuto et al. (2010), Marcellini et al. (2003) e Cavalcanti Mata et al. (2005).

Observa-se ainda pela análise da Tabela 10, maiores valores dos SST para o emulsificante albumina, em todas as concentrações, exceto na concentração de 5,0%. Nesta o teor de SST foi superado pela maltodextrina. Isso pode ser explicado pelo fato da albumina apresentar maior

concentração de sólidos solúveis totais seguida da maltodextrina, superliga neutra[®] e emustab[®] como constatado pela Tabela 5.

Os valores de açúcares solúveis totais na concentração 0,0% são ligeiramente superiores aos encontrados por Sacramento et al. (2003) e Cavalcanti Mata et al. (2005). Isso ocorre porque materiais biológicos são susceptíveis as alterações dos fatores como clima, solo, água, manejo e outros. Além disso, observa-se que a maltodextrina proporcionou maiores valores de açúcares solúveis totais para a espuma de graviola. Uma possível justificativa para esses valores encontrados é a presença do próprio emulsificante que é composto por unidades de glicose sendo quantificado pela análise. Entretanto, para os açúcares redutores a albumina contribuiu com os maiores valores, exceto na concentração de 7,5%.

Na Figura 15 estão apresentadas as curvas de regressão dos SST, açúcares solúveis totais (AST) e açúcares redutores (AR) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] em função da concentração destes.

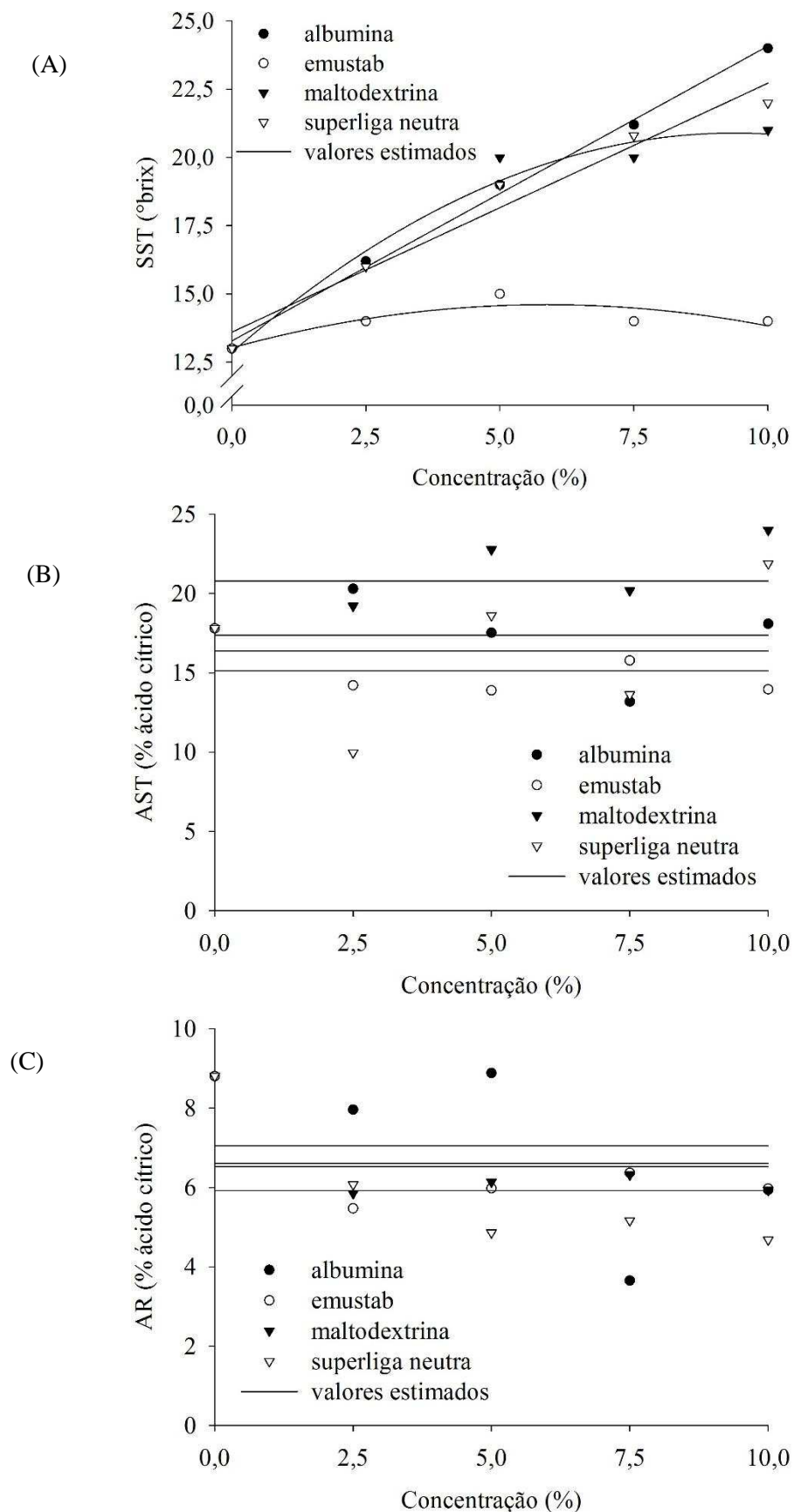


Figura 15: SST (a), AST (b) e AR (c) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

A adição dos emulsificantes contribuiu para a elevação dos SST. O aumento dos SST torna-se importante, pois podem promover alterações sensoriais e nutricionais no produto final. O tratamento com emustab® não apresentou grande acréscimo no teor de SST como os tratamentos com albumina, maltodextrina e superliga neutra®. Isso se deve aos distintos teores de SST dos mesmos (Tabela 5), o que explica os resultados apresentados na Figura 15A.

Aos dados experimentais do teor de açúcares solúveis totais (Figura 15B) e redutores (Figura 15C) não foi possível ajustar curvas de regressão, sendo a média representada pelas retas.

Nota-se pela Tabela 11, bom ajuste das equações de regressão para os SST uma vez que estas apresentaram bons coeficientes de determinação e significância dos parâmetros de regressão.

Tabela 11: Equações ajustadas aos dados experimentais dos SST, AST e AR da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$\hat{SST} = 1,08^* \times C + 13,28^*$	99,63
	$\hat{AST} = 17,3850$	-
	$\hat{AR} = 7,0504$	-
emustab®	$\hat{SST} = -0,05 \times C^2 + 0,54 \times C + 13,03^*$	77,14
	$\hat{AST} = 15,1323$	-
	$\hat{AR} = 6,5202$	-
maltodextrina	$\hat{SST} = -0,09 \times C^2 + 1,71^{**} \times C + 12,86^*$	96,89
	$\hat{AST} = 20,7957$	-
	$\hat{AR} = 6,6097$	-
superliga neutra®	$\hat{SST} = 0,91^* \times C + 13,60^*$	96,78
	$\hat{AST} = 16,3824$	-
	$\hat{AR} = 5,9174$	-

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

As características físicas, coordenadas L*, a* e b*, da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Médias das coordenadas L^* , a^* e b^* da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

L^*				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	68,54a	68,54a	68,54a	68,54a
2,5	84,04a	82,41a	67,97b	67,94b
5,0	89,98a	83,46a	66,74d	68,94c
7,5	88,97a	84,08b	66,14c	67,14c
10,0	87,76a	84,18b	64,12d	69,93c
a^*				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	-0,13a	-0,13a	-0,13a	-0,13a
2,5	0,21c	0,64b	0,38bc	1,66a
5,0	-0,67d	0,53b	-0,02c	2,24a
7,5	-0,62d	1,42b	0,54c	4,05a
10,0	-0,68c	1,75b	-0,40c	5,18a
b^*				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	13,78a	13,78a	13,78a	13,78a
2,5	12,83c	11,83c	14,17a	13,92a
5,0	9,42c	10,98b	14,20a	14,63a
7,5	9,01c	10,27b	14,45a	14,79a
10,0	10,42c	10,23c	13,31b	15,44a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O emulsificante albumina proporcionou os maiores valores para a coordenada L^* , enquanto que para as coordenadas a^* e b^* foi a superliga neutra[®]. Observa-se também, valores mais próximos de 100 para a luminosidade, indicando que as espumas de graviola tendem a ficarem mais brancas com os emulsificantes albumina e emustab[®] ou manterem-se próximos ao da polpa, no caso, da maltodextrina e superliga neutra[®]. Já a coordenada a^* variou de -0,68 a 5,18 e a coordenada b^* apresentou sempre valores positivos.

O acréscimo na coordenada L^* , isto é, o aumento da luminosidade, com a adição dos emulsificantes albumina e emustab[®] pode ser observado na Figura 16A. Resultado semelhante foi

constatado por Silva et al., (2008) na desidratação de polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. Segundo os mesmos autores as formulações tendem a serem mais claras, e tal comportamento deve-se a adição do agente espumante à polpa, seguida da batidura. Na obtenção da espuma há a diminuição da massa específica da polpa. Nesse processo ocorre o aprisionamento do ar em micelas líquidas, proporcionando a expansão da espuma, que pode ser umas das causas para o aumento da coordenada L^* .

Na Figura 16B está apresentado o comportamento da coordenada a^* em função da concentração para cada emulsificante. Esta aumentou com a elevação da concentração para os emulsificantes emustab[®] e superliga neutra[®]. A albumina e a maltodextrina não apresentou efeito no valor de a^* com o aumento de suas concentrações.

As curvas de regressão para a coordenada b^* estão apresentadas na Figura 16C. Nota-se que apenas para a superliga neutra[®] esta aumentou com a elevação da concentração.

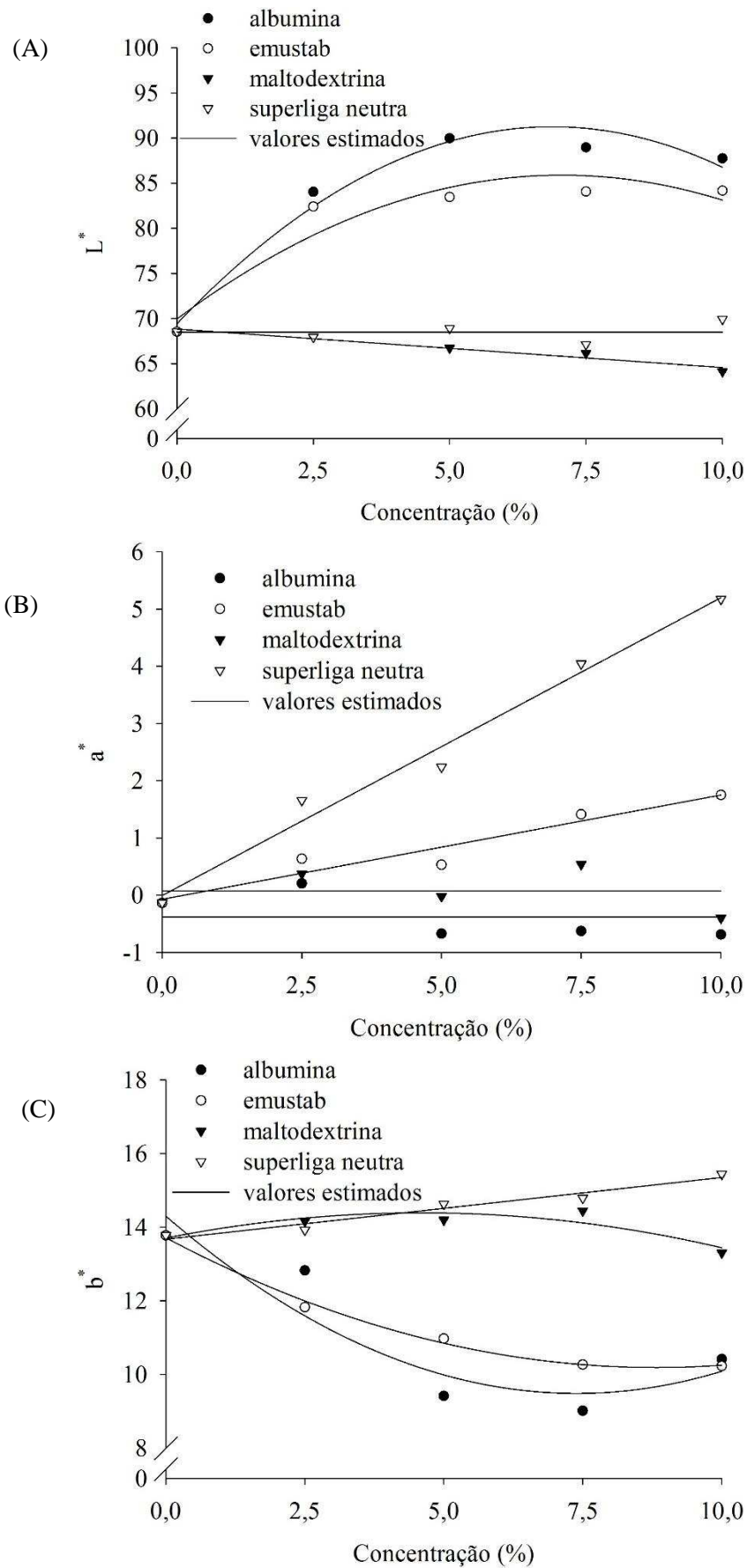


Figura 16: Coordenadas L^* (A), a^* (B) e b^* (C) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

As equações ajustadas aos dados experimentais das coordenadas L^* , a^* e b^* da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 13, na qual se certifica bom ajuste destas uma vez que apresentaram coeficiente de regressão superior a 78,07% e significâncias dos parâmetros dos modelos.

Tabela 13: Equações ajustadas aos dados experimentais das coordenadas L^* , a^* e b^* da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R^2 ou r^2 (%)
albumina	$\hat{L}^* = -0,46^{***} \times C^2 + 6,35^{***} \times C + 69,42^*$	97,13
	$\hat{a}^* = -0,38$	-
	$\hat{b}^* = 0,09 \times C^2 - 1,30 \times C + 14,30^*$	86,19
emustab®	$\hat{L}^* = -0,32 \times C^2 + 4,52^{***} \times C + 69,95^*$	90,45
	$\hat{a}^* = 0,18^* \times C - 0,07$	92,16
	$\hat{b}^* = 0,04^{**} \times C^2 - 0,80^* \times C + 13,71^*$	99,43
maltodextrina	$\hat{L}^* = -0,43^* \times C + 68,83^*$	95,09
	$\hat{a}^* = 0,07$	-
	$b^* = -0,03 \times C^2 + 0,30 \times C + 13,71^*$	78,07
superliga neutra®	$\hat{L}^* = 68,50$	-
	$\hat{a}^* = 0,52^* \times C - 0,004$	98,28
	$b^* = 0,17^* \times C + 13,67^*$	95,57

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Na Tabela 14 estão apresentadas as médias de h^* , C^* , ΔE e BI da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Tabela 14: Médias de h^* , C^* , ΔE e BI da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

h^*				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	90,56a	90,56a	90,56a	90,56a
2,5	89,07a	86,91c	88,53a	83,23c
5,0	94,08a	87,22c	90,09b	81,29d
7,5	93,96a	82,15c	87,86b	74,70d
10,0	93,76a	80,27d	91,84b	71,46d

C^*				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	13,78a	13,78a	13,78a	13,78a
2,5	12,83b	11,85c	14,18a	14,03a
5,0	9,44c	10,99b	14,20a	14,80a
7,5	9,03d	10,37c	14,46b	15,34a
10,0	10,44c	10,38c	13,32b	16,29a

ΔE				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	-	-	-	-
2,5	15,54a	14,05a	1,12b	1,94b
5,0	21,90a	15,21b	1,87c	2,56c
7,5	20,99a	16,02b	2,60d	4,53c
10,0	19,52a	16,16b	4,63c	5,76c

BI				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	21,51a	21,51a	21,51a	21,51a
2,5	16,17b	15,52b	22,97a	23,97a
5,0	10,14d	14,07c	23,07b	25,47a
7,5	9,79d	13,80c	24,40b	28,53a
10,0	11,62d	14,03c	21,98b	29,60a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O ângulo hue é um atributo que identifica a cor em vermelho, amarelo, verde e azul. (CAPARINO, et al., 2012), ou ainda, segundo Ramallo e Mascheroni (2012) é uma ferramenta analítica para descrever o que as pessoas pensam quando descrevem uma cor, sendo os valores dos ângulos de 0° (vermelho puro), 90° (amarelo puro), 180° (verde puro) e 270° (azul puro). Em todas as medições os valores de h^* foram mais próximos de 90°, indicando uma tendência de amarelo-alaranjado, e sendo maiores para o emulsificante albumina.

O croma representa a intensidade ou a pureza de hue (RAMALLO e MASCHERONI, 2012), isto é, distingue entre as cores vivas e as sem brilho (CAPARINO et al., 2012). Este foi maior para a formulação com superliga neutra[®], influenciado pelos valores das coordenadas a^* e b^* , indicando um aumento da cor amarelo-alaranjado.

A diferença total de cor permite uma análise da evolução da cor através das três coordenadas, L^* , a^* e b^* , uma vez que compara a condição inicial com as seguintes. Esta foi superior para a formulação com albumina, independente da concentração.

O índice de escurecimento foi menor a partir da concentração 5,0% para a formulação com albumina, indicando que com este emulsificante é possível evitar a ação indireta de enzimas que provocam a mudança de cor durante o processamento e armazenamento.

Na Figura 17 estão apresentadas as curvas de regressão para h^* e C^* da espuma de graviola em função da concentração para cada emulsificante.

O ângulo hue (h^*) diminuiu com o aumento da concentração para os emulsificantes emustab[®] e superliga neutra[®] enquanto, não se alterou para os emulsificantes albumina e maltodextrina. Já o croma (C^*) diminuiu com o aumento da concentração para as formulações com albumina, emustab[®] e maltodextrina, indicando menor pureza da cor, e aumentou com a adição de superliga neutra[®] à polpa seguida de batidura.

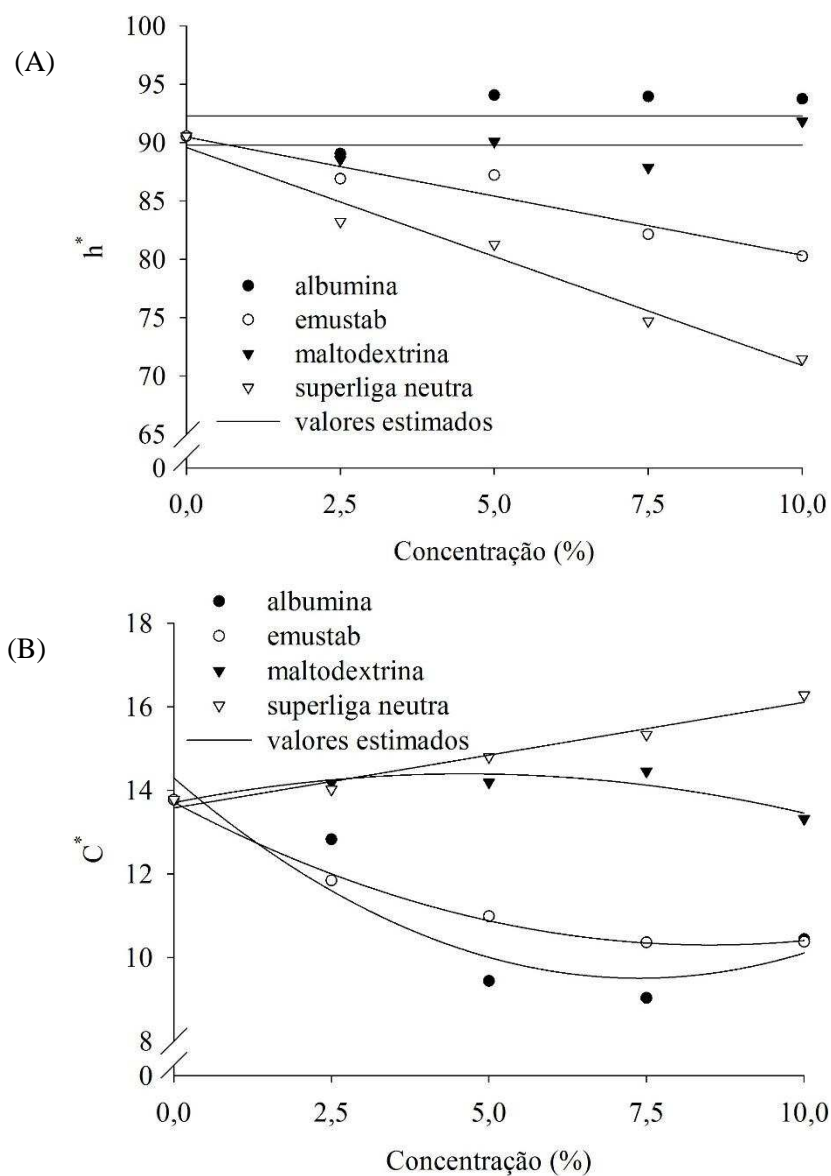


Figura 17: Índices colorimétricos h^* (A) e C^* (B) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Na Figura 18 estão apresentadas as curvas de regressão os índices colorimétricos ΔE e BI da espuma de graviola em função da concentração para cada emulsificante.

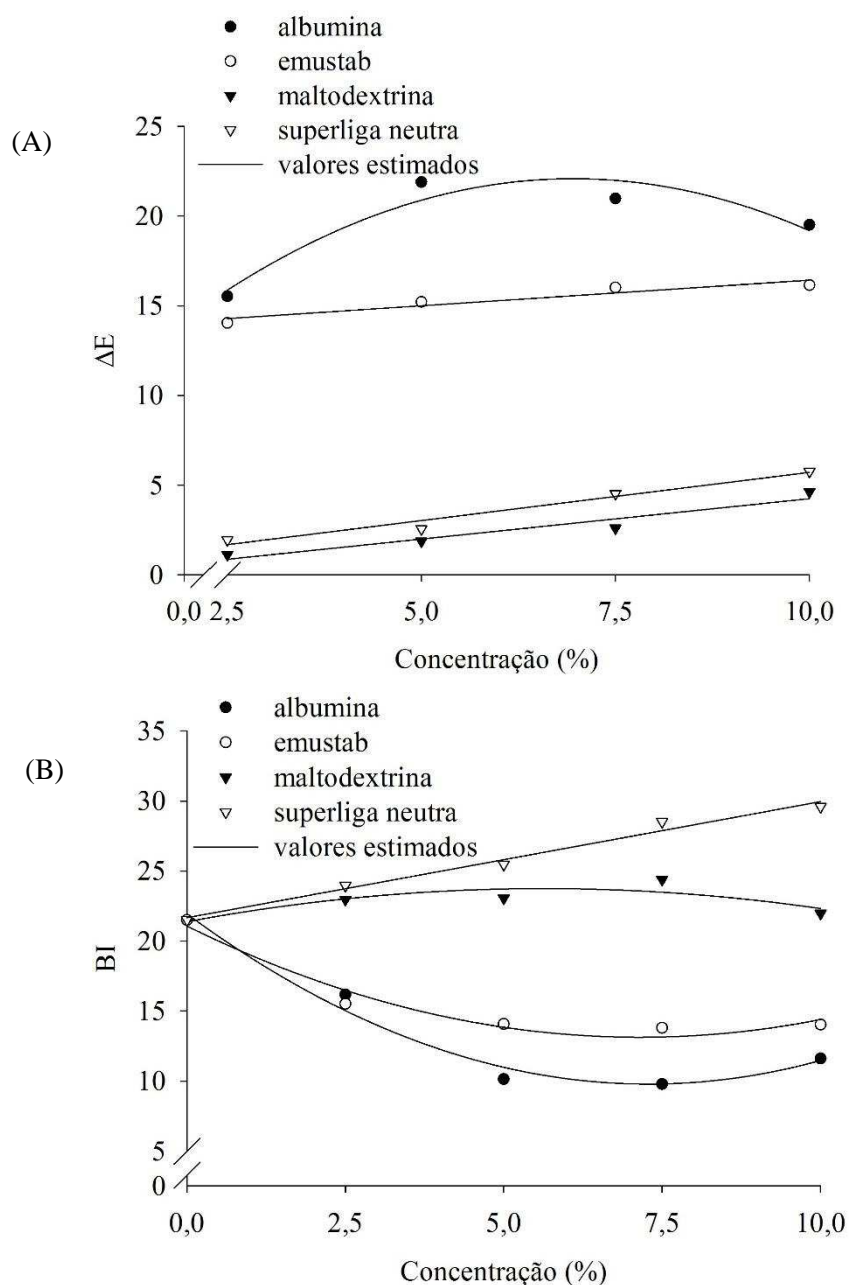


Figura 18: Índices colorimétricos ΔE (A) e BI (B) da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

A diferença total de cor (ΔE) aumentou com o acréscimo da concentração dos emulsificantes, sendo maior para a albumina, influenciada pela coordenada L^* . Já o índice de escurecimento (BI) aumentou com a adição do emulsificante à polpa seguida de batidura, para a superliga neutra[®], indicando que quanto maior a concentração, maior é o escurecimento da formulação, não sendo bom para a aparência do produto final.

Observa-se, na Tabela 15, que as equações que relacionam h^* , C^* , ΔE e BI da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante apresentaram valores satisfatórios para os coeficientes de determinação, além da significância dos coeficientes de regressão, indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 15: Equações ajustadas aos dados experimentais dos índices colorimétricos h^* , C^* , ΔE e BI da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
	$\hat{h}^* = 92,27$	-
albumina	$\hat{C}^* = 0,09 \times C^2 - 1,30 \times C + 14,30^*$	86,21
	$\Delta \hat{E} = -0,31 \times C^2 + 4,35 \times C + 6,94$	90,46
	$\hat{BI} = 0,23^{**} \times C^2 - 3,33^{**} \times C + 21,94^*$	97,78
	$\hat{h}^* = -1,01^* \times C + 90,49^*$	92,94
emustab [®]	$\hat{C}^* = 0,05^* \times C^2 - 0,80^* \times C + 13,72^*$	99,49
	$\Delta \hat{E} = 0,28^{**} \times C + 13,57^*$	90,40
	$\hat{BI} = 0,16^{**} \times C^2 - 2,22^{**} \times C + 21,07^*$	95,94
	$\hat{h}^* = 89,77$	-
maltodextrina	$\hat{C}^* = -0,03 \times C^2 + 0,30 \times C + 13,71^*$	77,71
	$\Delta \hat{E} = 0,45^{**} \times C - 0,26$	92,67
	$\hat{BI} = -0,07 \times C^2 + 0,84 \times C + 21,38^*$	72,03
	$\hat{h}^* = -1,87^* \times C + 89,59^*$	97,35
superliga neutra [®]	$\hat{C}^* = 0,25^* \times C + 13,58^*$	96,91
	$\Delta \hat{E} = 0,54^* \times C + 0,34$	96,67
	$\hat{BI} = 0,83^* \times C + 21,67^*$	98,32

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

5.2. Seleção do emulsificante e da concentração para a produção de espuma de graviola.

Por meio da análise de variância, verificou-se a existência de efeito significativo da interação emulsificante x concentração para a massa específica aparente, desta forma fez-se o teste de médias onde o resultado está apresentado na Tabela 16 e a análise de regressão na Figura 19 e Tabela 17.

Tabela 16: Médias da massa específica aparente da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Massa específica aparente (kg m ⁻³)				
Concentração (%)	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	1051,2626a	1051,2626a	1051,2626a	1051,2626a
2,5	568,4368c	545,7854d	1058,7024a	1033,6367b
5,0	260,0615d	504,7854d	1063,9639a	1011,7552b
7,5	205,4265d	481,0673c	1043,7698a	1025,0469b
10,0	209,7517d	471,8287c	1053,7665a	999,4172b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Van Arsdel e Copley (1964) a densidade das espumas para secagem em leito de espuma deve estar compreendida numa faixa de 100 a 600 kg m⁻³, assim, para as concentrações de 2,5, 5,0, 7,5 e 10% os emulsificantes albumina e emustab[®] poderiam ser usados para a produção de espuma de graviola.

O valor da massa específica aparente encontrado para a concentração 0,0% indica que a polpa de graviola é mais densa do que a água, o que é uma tendência das polpas de frutas em geral. Ela depende da temperatura e da concentração de sólidos solúveis. Segundo Brock et al. (2008) o conhecimento dessa e de outras propriedades termofísicas, como a viscosidade, a condutividade e a difusividade são de fundamental importância para a consecução das etapas de projetos de equipamentos e de processos ou mesmo para especificação do produto.

Conforme observado na Figura 19, para os emulsificantes albumina, emustab[®] e superliga neutra[®], na medida que se aumenta a concentração dos mesmos a massa específica aparente diminui. Isso ocorre porque com a adição de mais emulsificante, maior é a incorporação de ar. Os emulsificantes são moléculas anfifílicas, possuem região polar, solúveis em água e não polar, insolúveis em água, na mesma molécula (ARAÚJO, 2011). Quando adicionados a um sistema com água, como em polpa de frutas e hortaliças, estes irão saturar a superfície do líquido até um ponto onde a tensão superficial é reduzida a um valor muito baixo. Neste momento a penetração de bolhas de ar no líquido, através da agitação, é facilitada garantindo assim uma maior aeração interna (PALMA et al., 2004). Já para a maltodextrina, não foi verificado efeito, ou seja, a massa específica não se alterou.

Ainda analisando a Figura 19, observa-se que a massa específica aparente das espumas com os emulsificantes albumina e emustab[®] em baixas concentrações foram altas devido ao fato do movimento do agente formador de espuma da fase aquosa para a interface ar-aquoso ter sua função limitada, insuficiente para reduzir a tensão superficial. Além disso, em concentrações

elevadas dos emulsificantes, a massa específica aparente tende a permanecer constante devido ao excesso destes.

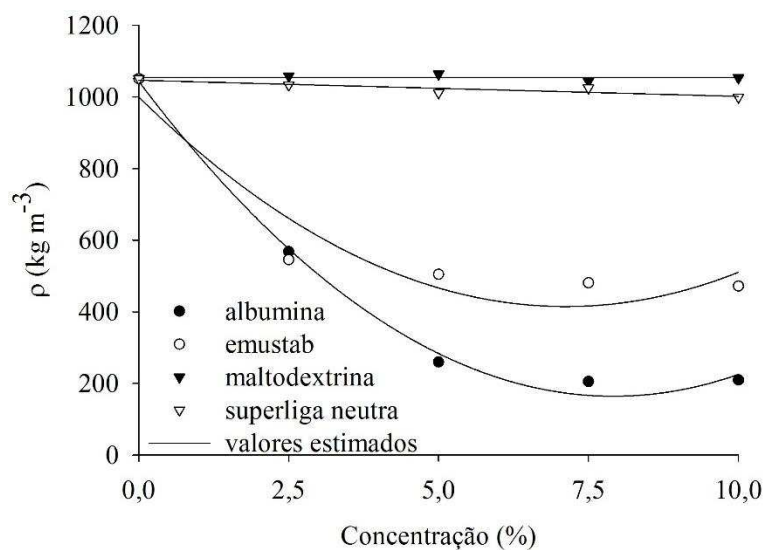


Figura 19: Massa específica aparente da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Com o intuito de conhecer qual é a mínima concentração para a produção de espuma adequada à secagem, pelo parâmetro massa específica aparente, fez-se necessário derivar as equações (Tabela 17) em relação a concentração e igualar a zero. Deste modo, para os emulsificantes albumina e emustab® o valor foi de 7,91 e 7,12%, respectivamente.

Tabela 17: Equações ajustadas aos dados experimentais de massa específica aparente da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$\hat{\rho} = 14,0348^* \times C^2 - 222,1896^* \times C + 1043,6306^*$	99,54
emustab®	$\hat{\rho} = 11,5409 \times C^2 - 164,3522^{**} \times C + 999,9188^*$	90,61
maltodextrina	$\hat{\rho} = 1045,2754$	-
superliga neutra®	$\hat{\rho} = -4,4914^{**} \times C + 1046,6810^*$	79,23

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Sabendo que apenas a massa específica aparente não é conclusiva para a seleção do melhor emulsificante e concentração determinou-se a expansão da espuma de graviola, onde as médias estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Médias da expansão da espuma de graviola para os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Concentração (%)	Expansão (%)			
	Emulsificante			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
2,5	85,0315a	92,6215a	-0,7022b	1,7137b
5,0	304,3104a	108,2854b	-1,1916c	3,9156c
7,5	412,0539a	118,5347b	0,7204c	2,5845c
10,0	401,3143a	122,8090b	-0,2241c	5,2662c

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As propriedades espumantes abrangem a capacidade de formação de uma dispersão de ar em água, que se deve à expansão do volume da dispersão promovida por um emulsificante, com incorporação de ar através das técnicas de batimento, agitação ou aeração (CAPITANI, 2004). A expansão do volume da dispersão está relacionada com a superfície específica. Quanto maior a expansão, maior é a área de contato entre a fase dispersa e a fase contínua, que refletirá no processo de secagem. Sendo apenas de interesse os emulsificantes albumina e emustab[®], o que apresentou maior expansão foi a albumina (Tabela 18), aumentando em mais de 4,5 vezes.

Analisando a Figura 20, observa-se que com o aumento da concentração maior é a expansão da espuma para os emulsificantes albumina e emustab[®]. Para a maltodextrina e a superliga neutra[®] a mesma não se alterou.

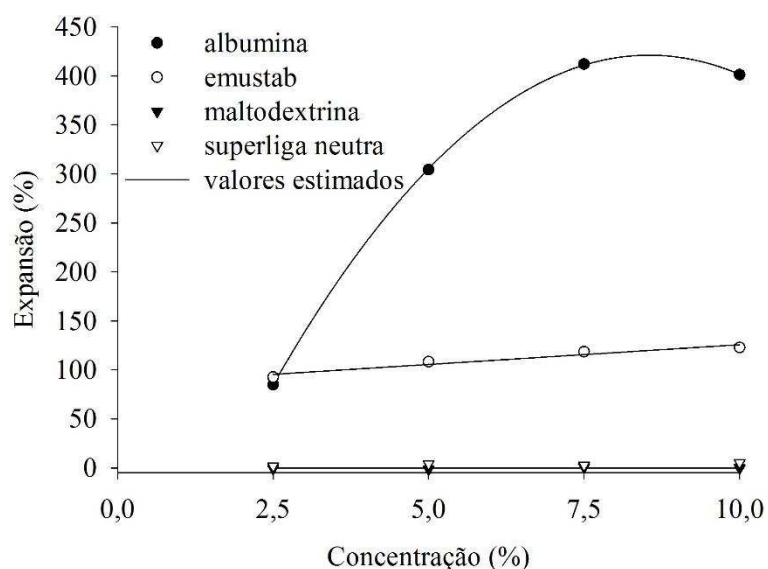


Figura 20: Expansão da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Na Tabela 19 estão apresentadas as equações ajustadas aos dados experimentais da expansão da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação. Derivando a equação em relação à concentração para saber qual é a concentração ideal na produção de espuma de graviola viável para a secagem tem-se a concentração de 8,54% para a albumina.

Tabela 19: Equações ajustadas aos dados experimentais da expansão da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$E\hat{X} = -9,2015^* \times C^2 + 157,2841^* \times C - 251,0340^*$	99,99
emustab®	$E\hat{X} = 4,0325^{**} \times C - 85,3597^*$	93,99
maltodextrina	$E\hat{X} = -0,3494$	-
superliga neutra®	$E\hat{X} = 3,37$	-

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

O último parâmetro a ser analisado é a estabilidade. De acordo com os valores apresentados da estabilidade da espuma de graviola (Tabela 20), a superliga neutra® seria o emulsificante ideal, porque não apresentou espuma coalescida. Entretanto, este apresentou massa específica aparente superior ao preconizado por Van Arsdel e Copley (1964) e mínima expansão.

Os emulsificantes albumina e emustab[®] apresentaram os menores valores de estabilidade, mas a albumina na concentração de 7,5% foi a menor indicando que esse é o emulsificante correto assim como, os resultados de massa específica aparente e expansão.

Tabela 20: Médias da estabilidade da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab[®], maltodextrina e superliga neutra[®] nas concentrações de 0,0 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

Concentração (%)	Estabilidade (%)			
	Emulsificantes			
	albumina	emustab [®]	maltodextrina	superliga neutra [®]
0,0	32,9764a	32,9764a	32,9764a	32,9764a
2,5	11,3318b	8,3040c	15,2400a	0,0d
5,0	4,9357b	6,4527b	10,2269a	0,0c
7,5	2,3959bc	3,9335b	7,9976a	0,0c
10,0	3,3590b	3,2326b	8,0822a	0,0c

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A elaboração da maioria das espumas geralmente envolve uma batidura como processo dinâmico altamente energético, que se requer para formar a interface gás-líquido. No entanto, devido à energia ser liberada sob o relaxamento, as espumas são inerentemente instáveis (GERMAN et al., 1985). O processo de instabilidade começa com a drenagem da fase contínua através dos filmes finos entre as bolhas. Como resultado, há o rompimento das lamelas da espuma favorecendo a transferência de massa de gás através dele, o que leva ao crescimento de bolhas grandes em detrimento das pequenas. Este processo continua com a coalescência de bolhas (o colapso do fino filme entre duas bolhas, e as duas se fundem para formar uma grande bolha), terminando na separação de fases (NARSIMHAN, 1991). A progressão desse processo determina o tempo de vida da espuma.

Na Figura 21 estão apresentadas as curvas de estabilidade da espuma de graviola em função da concentração. À medida que se aumenta a concentração, a estabilidade da espuma para os emulsificantes estudados diminui.

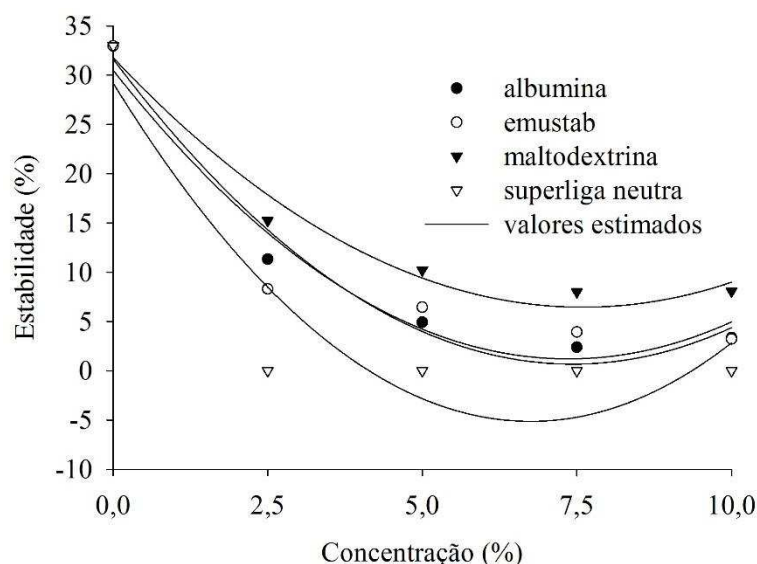


Figura 21: Estabilidade da espuma de graviola com os emulsificantes albumina, emustab®, maltodextrina e superliga neutra® nas concentrações de 0,0, 2,5, 5,0, 7,5 e 10,0% em massa.

As equações ajustadas para a estabilidade da espuma estão apresentadas na Tabela 21. Derivando a equação para o emulsificante albumina em relação à concentração tem-se uma concentração mínima de 7,43%.

Tabela 21: Equações ajustadas aos dados experimentais de estabilidade da espuma de graviola em função da concentração do emulsificante e seus respectivos coeficientes de determinação.

Emulsificante	Equações ajustadas	R ² ou r ² (%)
albumina	$E\hat{T} = 0,5608^{**} \times C^2 - 8,3350^{**} \times C + 31,6442^*$	97,62
emustab®	$E\hat{T} = 0,5403 \times C^2 - 7,9572^{***} \times C + 30,5050^{**}$	91,35
maltodextrina	$E\hat{T} = 0,4392^{**} \times C^2 - 6,6728^{**} \times C + 31,8002^*$	97,26
superliga neutra®	$E\hat{T} = 0,7577 \times C^2 - 10,1756 \times C + 29,2077$	85,70

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

A partir da análise dos três parâmetros constatou-se que a albumina atende aos requisitos, contudo a concentração não foi a mesma. Foram de 7,91, 8,54 e 7,43% para a massa específica aparente, a expansão e estabilidade, respectivamente. Logo, optou-se por utilizar a menor concentração do emulsificante por fins econômicos.

5.3. Secagem em leito de espuma.

Na Figura 22 estão apresentados os valores de temperatura e umidade relativa do ar durante a secagem. Essa foi a condição na qual a temperatura foi ajustada para 50 °C e a umidade

relativa do ar inicialmente era de 60%. Observa-se que com o decorrer da secagem, a temperatura do ar manteve-se em torno de 50 °C entretanto, a umidade relativa caiu. Para todas as outras condições de secagem essas duas propriedades psicrométricas do ar apresentaram o mesmo comportamento.

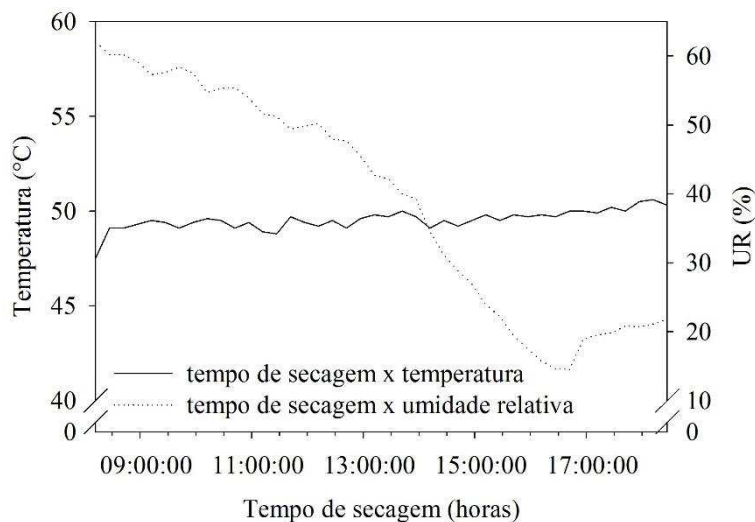


Figura 22: Temperatura e umidade relativa do ar durante a secagem.

Na Figura 23 estão apresentadas as curvas de secagem de espuma de graviola, para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Quando as espumas de graviola foram secas a 40 °C, o tempo necessário para reduzir o teor de água para cerca de $0,13 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$ foi de 1035 min. Já para 80 °C o tempo foi de 225 min, 4,6 vezes menor. À medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui e as curvas adquirem uma maior inclinação, uma vez que, há maior quantidade de calor transferido do ar para o material e conseqüentemente, ocorre um aumento na velocidade de migração da água presente no interior do produto para a superfície.

Ainda analisando a Figura 23, nela é possível evidenciar os distintos períodos de secagem, período de taxa constante e o de taxa decrescente. Segundo Park et al. (2007), no período de taxa constante a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande. A água evapora-se como água livre, uma vez que sua pressão de vapor é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, também é constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam. Segundo Thuwapanichayanan et al. (2008), o transporte da água do interior da espuma ocorre por capilaridade e difusão de vapor. Além disso, Brooker et al. (1992), afirmam que este período a secagem é dependente apenas das condições externas do processo (velocidade, temperatura e umidade relativa do ar).

A remoção de água do interior da espuma de graviola para a superfície exposta não é suficiente para manter esta úmida. Assim, inicia-se o período de taxa de secagem decrescente governado pelo mecanismo de difusão. Nele, segundo Brooker et al. (1992), a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa porque a resistência interna ao transporte de

água torna-se maior do que a resistência externa. Fator que limita a redução da migração de água do interior do produto para a superfície deste. E a temperatura do produto aumenta, podendo atingir a temperatura do ar de secagem.

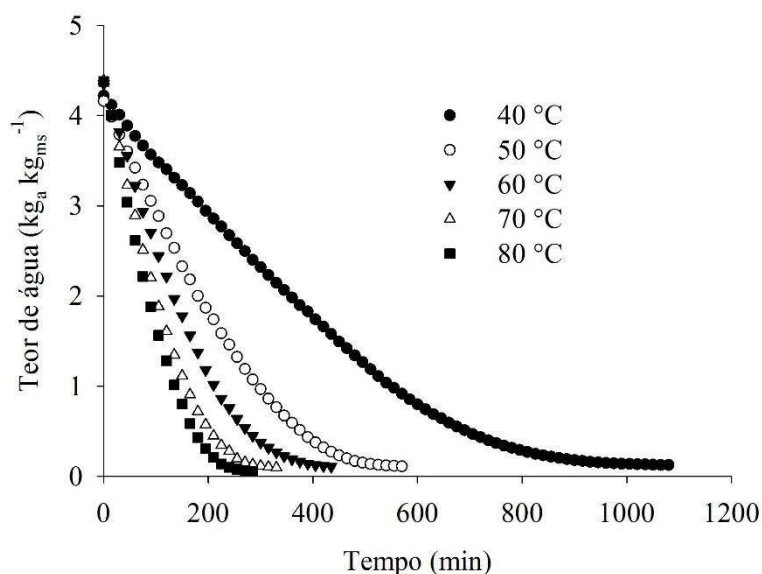


Figura 23: Curvas de secagem de espuma de graviola para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Na Tabela 22 estão apresentados os valores do erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), coeficientes de determinação (R^2) e distribuição de resíduos (DR) da adequação do modelo dado pela Equação 7, para a faixa de temperatura de 40 a 80 °C. Observa-se que o modelo apresentou bom ajuste.

Tabela 22: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), coeficientes de determinação (R^2) e distribuição de resíduos (DR) da adequação do modelo dado pela Equação 7, para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C

Temperatura (°C)	P(%)	SE	R^2 (%)	DR
40	4,348	0,026	99,92	aleatória
50	4,616	0,040	99,92	aleatória
60	3,198	0,046	99,89	aleatória
70	4,945	0,037	99,94	aleatória
80	7,870	0,053	99,88	aleatória

Segundo Resende et al. (2010), o coeficiente de determinação apesar de não ser um bom parâmetro para verificar o ajuste de modelos não-lineares, normalmente apresenta maiores valores para os modelos que melhor se ajustam aos dados experimentais. Verifica-se que os coeficientes de determinação apresentaram-se superiores a 99%.

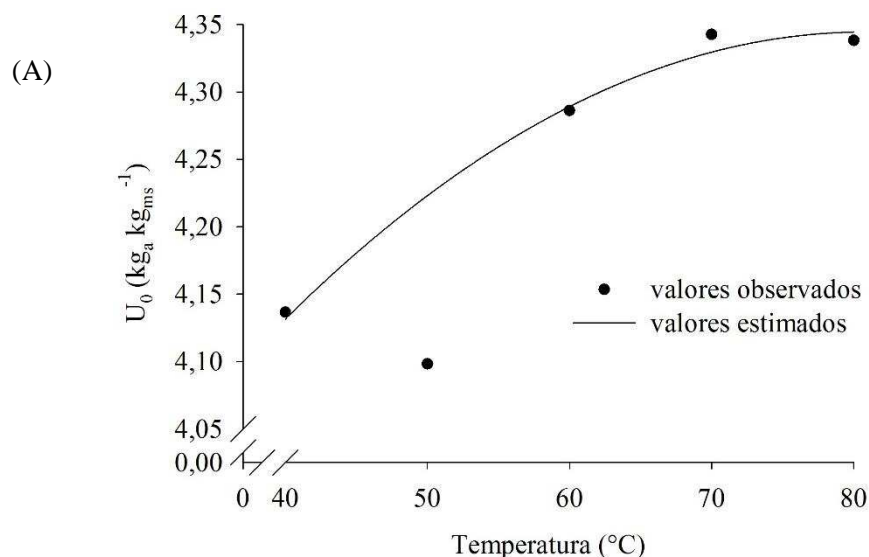
O erro médio estimado, que descreve o valor do desvio padrão da estimativa, apresentou valores reduzidos em todas as condições de secagem sendo assim, o modelo é indicado para

representação do fenômeno. Vale salientar que quanto menor for o valor do desvio padrão da estimativa (SE), melhor será a qualidade do ajuste do modelo em relação aos dados observados. De acordo com Draper e Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

Conforme Samapundo et al. (2007), valores inferiores a 10% de erro médio relativo indicam boa adequabilidade para fins práticos. Assim, analisando os valores encontrados constata-se que o modelo proposto é apropriado para descrever o fenômeno de secagem de espuma de graviola e além disso, determinar o ponto de transição entre o período de secagem constante e decrescente.

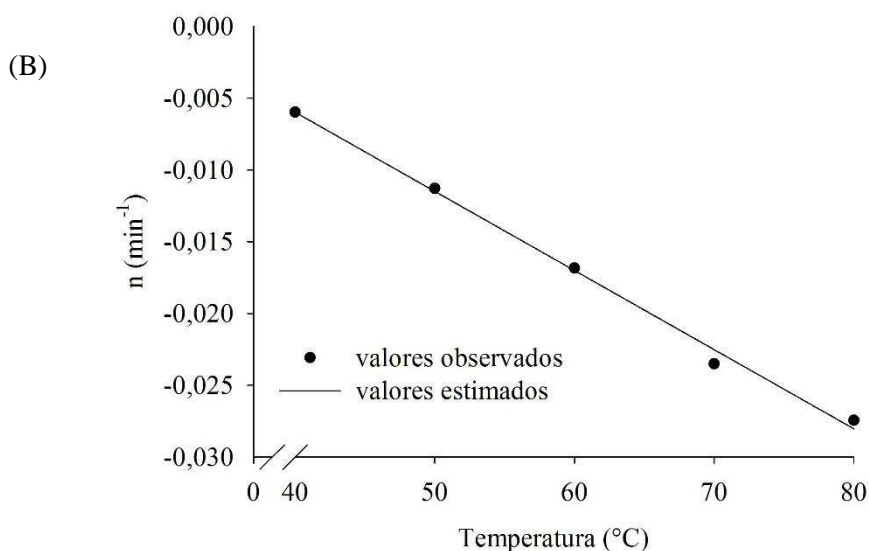
Finalmente, a análise de distribuição de resíduos se faz necessário para uma correta avaliação do modelo. Mesmo quando os parâmetros estatísticos apresentam bons resultados o modelo pode ser ineficaz se apresentar distribuição de resíduo tendenciosa. Isso não foi observado para o modelo proposto.

Na Figura 24 está apresentado o efeito da temperatura de secagem sobre os parâmetros U_0 e n do modelo dado pela Equação 7, as equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.



$$\hat{U}_0 = -0,0001^{**} \times T^2 - 0,0207^{**} \times T + 3,5093^*$$

$$R^2 = 98,92\%$$



$$\hat{n} = -0,0006^* \times T + 0,0161^*$$

$$r^2 = 99,54\%$$

Figura 24: Efeito da temperatura de secagem sobre os parâmetros U_0 (A) e n (B) do modelo dado pela Equação 7, equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Para a taxa de secagem constante, conforme a Figura 24A, o teor de água inicial aumentou com a elevação da temperatura e apresentou um ótimo ajuste. Este variou de 4,09 a 4,33 kgₐ kgₘₛ⁻¹. Valores influenciados apenas pelas características iniciais das amostras, uma vez que a concentração de albumina foi de 7,43% para todas as condições de secagem. O parâmetro n (Figura 24B) representa a taxa de secagem do período constante. É possível inferir que à medida

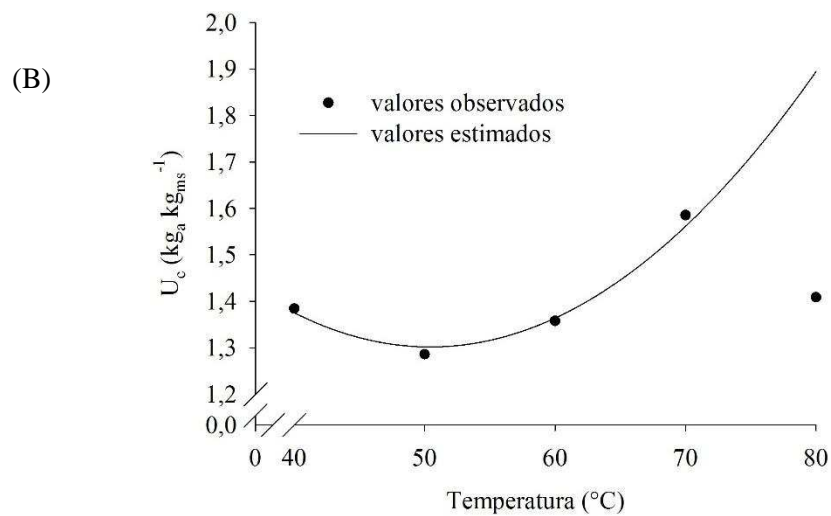
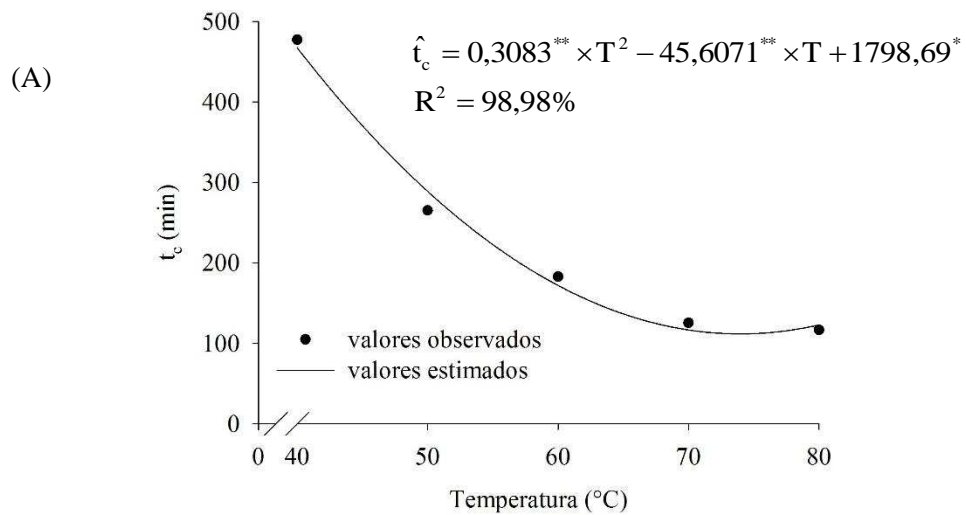
que se aumenta a temperatura, em módulo, a taxa de secagem também aumenta, com um ajuste linear para o modelo e coeficiente de determinação de 99,54%.

O efeito da temperatura de secagem sobre o tempo crítico pode ser facilmente observado pela Figura 25A. À medida que a temperatura aumenta, o tempo crítico diminui. Este juntamente com o teor de água crítico representa o ponto de transição entre os distintos períodos de secagem.

O teor de água crítico (Figura 25B) é o teor de água a partir do qual a camada externa laminar de água diminui e a temperatura da superfície do produto começa a aumentar, tendendo a se igualar a do ambiente externo. A partir dele a curva de secagem decresce exponencialmente. Conforme Brooker et al. (1992), este depende das condições de secagem, e das características do produto, como a forma e a textura.

O efeito da temperatura sobre o teor de água crítico foi o mesmo obtido por Reis et al. (2013) e Waje et al. (2004), U_c aumentou com a elevação da temperatura de secagem. Em contrapartida, Stupa et al. (2003), obtiveram resultados diferentes. Isso leva a concluir que muitos estudos devem ser feitos para maior esclarecimento sobre o assunto. Para a temperatura de 80 °C observou-se uma redução no teor de água crítico. Isso provavelmente ocorreu devido à falta de estabilidade da espuma durante a desidratação. Se a espuma não permanece estável, ocorre colapso celular comprometendo seriamente a operação de secagem. A confirmação disso pode ser pela formação de uma crosta dura sobre as amostras, ou seja, a estrutura porosa esperada não se manteve. Além disso, nestas amostras o pó formado era dificilmente removido das bandejas.

O parâmetro k (Figura 25C), que representa a taxa de secagem no período decrescente, aumentou em módulo, com o incremento da temperatura de secagem, de 0,019 para 0,047.



$$\hat{U}_c = 0,0007^* \times T^2 - 0,0684^* \times T + 3,0259^*$$

$$R^2 = 99,55\%$$

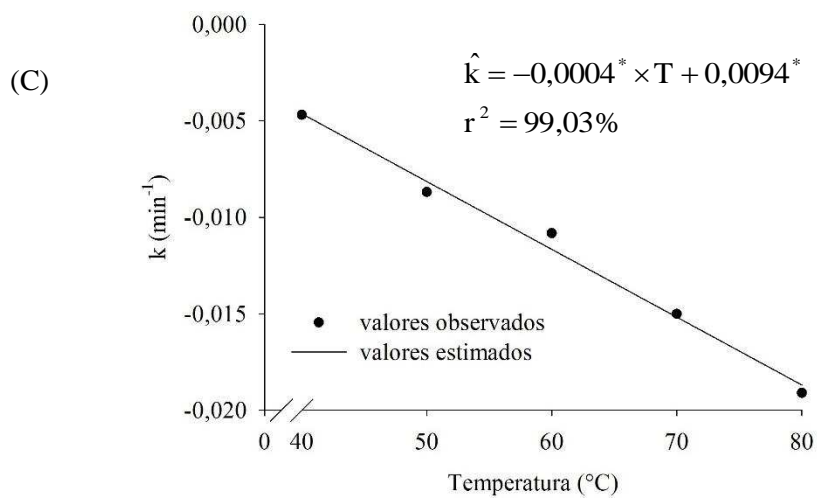


Figura 25: Efeito da temperatura de secagem sobre os parâmetros t_c (A), U_c (B) e k (C) do modelo dado pela Equação 7, equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Na Figura 26 estão apresentados os valores experimentais das curvas de razão de umidade da espuma de graviola para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Elas representam a perda de água em função do tempo para o período de secagem decrescente, exponencial. À medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui.

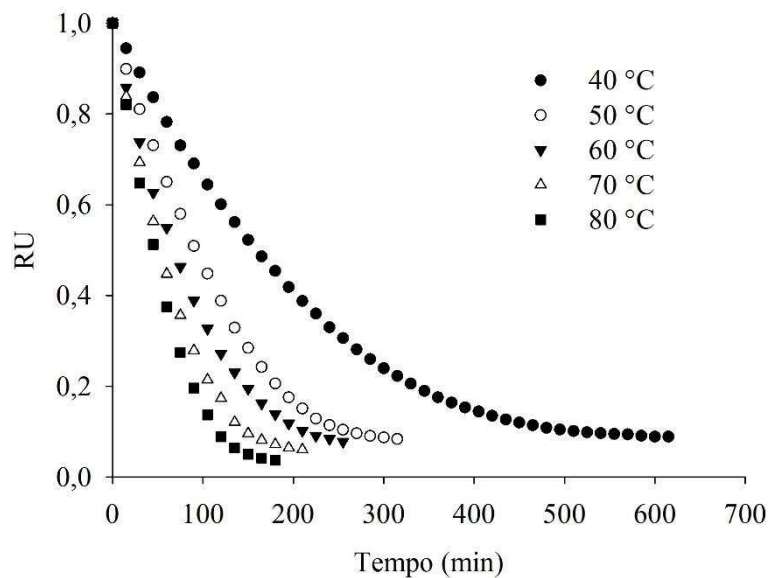


Figura 26: Valores experimentais das curvas de razão de umidade da espuma de graviola para as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

As curvas da Figura 26 foram ajustados diferentes modelos matemáticos relatados na literatura que descrevem o fenômeno de secagem e os resultados estão apresentados nas Tabelas 23 a 27.

Tabela 23: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros das curvas de secagem de espuma de graviola para a temperatura de 40 °C.

Modelo	40 °C				
	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	Estimativa dos parâmetros
Aproximação da difusão	6,632	0,012	99,80	tendenciosa	a=-0,0589; k=0,0300; b=0,1589
Exponencial de dois termos	7,557	0,014	99,74	tendenciosa	a=1,4668; k=0,0052
Henderson e Pabis	6,862	0,013	99,74	tendenciosa	a=1,0252; k=0,0046
Logarítmo	6,270	0,013	99,76	tendenciosa	a=1,0194; k=0,0047; b=0,0103
Midili	1,970	0,005	99,96	aleatória	a=0,9865; k=0,0017; n=1,1843; b=0,00008
Newton	7,253	0,015	99,66	tendenciosa	k=0,0045
Page	7,217	0,013	99,76	tendenciosa	k=0,0033; n=1,0536

Tabela 24: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), Coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros das curvas de secagem de espuma de graviola para a temperatura de 50 °C.

Modelo	50 °C				
	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	Estimativa dos parâmetros
Aproximação da difusão	5,666	0,011	99,86	tendenciosa	a=-0,3101; k=0,0231; b=0,4265
Exponencial de dois termos	5,999	0,011	99,85	tendenciosa	a=1,6543; k=0,0106
Henderson e Pabis	7,491	0,020	99,53	tendenciosa	a=1,0373; k=0,0084
Logarítmo	8,258	0,018	99,65	tendenciosa	a=1,0674; k=0,0076; b=-0,0436
Midili	3,410	0,009	99,90	aleatória	a=0,9829; k=0,0026; n=1,2340; b=0,0001
Newton	8,895	0,023	99,33	tendenciosa	k=0,0081
Page	6,094	0,011	99,84	tendenciosa	k=0,0042; n=1,1332

Tabela 25: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), Coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros das curvas de secagem de espuma de graviola para a temperatura de 60 °C.

Modelo	60 °C				
	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	Estimativa dos parâmetros
Aproximação da difusão	3,433	0,007	99,94	aleatória	a=-0,2180; k=0,0453; b=0,3582
Exponencial de dois termos	3,747	0,007	99,93	aleatória	a=1,6255; k=0,0178
Henderson e Pabis	3,716	0,008	99,91	aleatória	a=1,0303; k=0,0144
Logarítmo	3,974	0,008	99,91	aleatória	a=1,0486; k=0,0134; b=-0,0270
Midili	2,188	0,006	99,96	aleatória	a=0,9941; k=0,0065; n=1,1808; b=0,0001
Newton	4,016	0,009	99,89	aleatória	k=0,0139
Page	3,578	0,007	99,93	aleatória	k=0,0082; n=1,0362

Tabela 26: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), Coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros das curvas de secagem de espuma de graviola para a temperatura de 70 °C.

Modelo	70 °C				
	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	Estimativa dos parâmetros
Aproximação da difusão	6,330	0,009	99,91	aleatória	a=-0,2180; k=0,0453; b=0,3582
Exponencial de dois termos	6,885	0,009	99,90	aleatória	a=1,6255; k=0,0178
Henderson e Pabis	8,102	0,018	99,67	tendenciosa	a=1,0303; k=0,0144
Logarítmo	9,460	0,016	99,74	tendenciosa	a=1,0486; k=0,0134; b=-0,0270
Midili	3,893	0,007	99,95	aleatória	a=0,9941; k=0,0065; n=1,1808; b=0,0001
Newton	9,268	0,020	99,55	tendenciosa	k=0,0139
Page	6,888	0,009	99,90	aleatória	k=0,0082; n=1,1179

Tabela 27: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), Coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros das curvas de secagem de espuma de graviola para a temperatura de 80 °C.

Modelo	80 °C				Estimativa dos parâmetros
	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	
Aproximação da difusão	10,654	0,019	99,68	aleatória	a=1,1281; k=0,0191; b=57,0853
Exponencial de dois termos	6,5107	0,008	99,93	aleatória	a=1,7593; k=0,0232
Henderson e Pabis	18,111	0,029	99,25	tendenciosa	a=1,0435; k=0,0177
Logarítmo	16,033	0,021	99,62	tendenciosa	a=1,0887; k=0,0151; b=-0,0630
Midili	5,505	0,009	99,94	aleatória	a=0,9936; k=0,0061; n=1,2400, b=0,00004
Newton	22,145	0,032	99,01	tendenciosa	k=0,0170
Page	6,902	0,008	99,93	aleatória	k=0,0069; n=1,2119

Observa-se pela análise das Tabelas 23 a 27, apenas o modelo Midili é apto a descrever o fenômeno de secagem de espuma de graviola, pelas mesmas justificativas da adequabilidade do modelo dado pela Equação 7.

Kadam e Balasubramanian (2011) ao estudar a cinética de secagem em leite de espuma de suco de tomate concluíram que o modelo Logarítmo foi melhor para descrever a secagem do produto. Soares (2009), em seu trabalho de caracterização de aditivos para secagem de araçá-boi em leite de espuma usou critérios mais sólidos para a escolha do modelo e obteve melhor ajuste para o modelo Dois Termos.

Segundo Martinazzo et al. (2007), o coeficiente de difusão é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração da água e o seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. Como existem vários possíveis mecanismos de transporte de água em produtos capilares porosos tais como: movimentação de líquido devido a forças superficiais (difusão capilar), movimentação de líquido devido à difusão de água nas superfícies dos poros (difusão na superfície), movimentação de líquido e vapor devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade (fluxo hidrodinâmico), movimentação de vapor devido ao gradiente de pressão parcial de vapor (difusão de vapor) e movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica) (Brooker et al., 1992), o coeficiente de difusão é melhor representado como coeficiente de difusão efetiva.

Pode-se entender também, a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material.

Na Tabela 28 estão apresentados os valores dos coeficientes de difusão efetiva da espuma de graviola, secas nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

Tabela 28: Coeficientes de difusão efetiva ($m^2 s^{-1}$) da espuma de graviola secas nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C, equação de regressão em função da temperatura (T) e o respectivo coeficiente de determinação

Temperatura (°C)				
40	50	60	70	80
$4,122 \times 10^{-10}$	$7,732 \times 10^{-10}$	$1,102 \times 10^{-9}$	$1,502 \times 10^{-9}$	$1,766 \times 10^{-9}$
$D_{ef} = -1 \times 10^{-9} + 3 \times 10^{-11} \times T$				$r^2=99,70\%$

Observa-se pela Tabela 28 que os valores do coeficiente de difusão efetiva da espuma de graviola aumentaram com a elevação da temperatura e apresentaram correlação linear com a temperatura de secagem. Esse fato é esperado, uma vez que elevando a temperatura a viscosidade da água diminui. Essa propriedade influi diretamente na resistência do fluido ao escoamento, e, portanto, sua diminuição acarreta em maiores facilidades da difusão das moléculas de água nos capilares do produto. O mesmo foi observado por Kadam e Balasubranian (2011) e Thuwapanichayanan et al. (2008).

A variação do coeficiente de difusão efetiva em função da temperatura de secagem é descrita pela relação de Arrhenius (Figura 27).

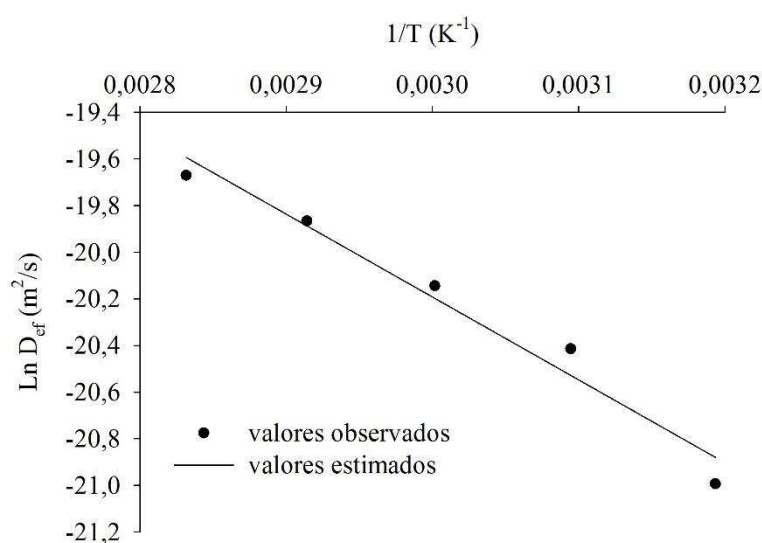


Figura 27: Representação de Arrhenius para a espuma de graviola.

A inclinação desta curva fornece a relação E_a/R , enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 . Logo, a relação de Arrhenius pode ser escrita:

$$D_{ef} = 1,57 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{33106,34}{RT_a}\right)$$

A energia de ativação foi 33,106 kJ mol⁻¹. Ligeiramente superior aos valores observado por Thuwapanichayanan et al. (2008), de 21,08, 22,90 e 25,19 kJ mol⁻¹ para as densidades de espuma de 0,3, 0,5 e 0,7 g cm⁻³, respectivamente. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. Em outras palavras, menor será a energia necessária para que a transformação física ocorra, nesse caso a transformação da água livre líquida em vapor (secagem) (CORRÊA et al., 2010).

5.4. Isotermas de sorção.

Na Tabela 29 estão apresentados os valores do erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), coeficientes de determinação (R^2) e distribuição de resíduos (DR) dos modelos ajustados aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio higroscópico do pó de graviola para a faixa de temperatura de 10 a 50 °C.

Tabela 29: Erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), coeficientes de determinação (R^2), distribuição de resíduos (DR) e estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados aos dados experimentais do teor de água de equilíbrio higroscópico do pó de graviola para a faixa de temperatura de 10 a 50 °C.

Modelos	P(%)	SE	R^2 (%)	DR	Estimativa dos parâmetros
Chung-Pfost	16,759	4,541	91,37	tendenciosa	a=98,6221; b=15,0419; c=155,7401
Copace	11,162	3,350	95,30	tendenciosa	a=2,0789; b=0,0024; c=2,2271
GAB 10 °C	3,602	1,770	99,70	aleatória	$U_m=12,5893$; C=109,3006; K=0,8794;
GAB 20 °C	0,3241	0,199	99,99	aleatória	$U_m=12,2234$; C=268,6489; K=0,9191
GAB 30 °C	3,282	1,422	99,80	aleatória	$U_m=11,3022$; C=492,7490; K=0,9375
GAB 40 °C	6,270	2,032	99,99	aleatória	$U_m=9,9742$; C=784,5872; K=0,9780
GAB 50 °C	4,620	1,353	99,49	aleatória	$U_m=9,1099$; C=1339,4308; K=0,9771
Halsey modificado	6,993	2,531	97,32	aleatória	a=4,8842; b=-0,0019; c=1,6791
Oswin modificado	11,156	3,181	95,77	tendenciosa	a=24,3201; b=-0,0409; c=2,1965
Sigma-Copace	7,020	2,538	97,30	aleatória	a=1,0767; b=0,0019; c=1,2455

Constata-se pela análise da Tabela 29 que os modelos de GAB, Halsey modificado e Sigma-Copace são aptos para descrever o fenômeno de sorção de água do pó de graviola pelas mesmas justificativas da adequabilidade do modelo dado pela Equação 7.

A aplicação do modelo de GAB é mais vantajosa do que outros modelos, pois seus coeficientes apresentam significado físico, permitindo um estudo mais detalhado da transferência de calor e massa que ocorre durante a sorção.

Segundo Oliveira et al., (2011) o teor de água da monocamada indica a quantidade de água que está fortemente ligada em locais específicos do alimento, este é um valor que deve ser alcançado a fim de assegurar a estabilidade dos alimentos (LAVOYER et al., 2013). Os valores deste coeficiente diminuiram à medida que a temperatura aumentou (Tabela 29), variando entre 12,5893 a 9,1099% b.s. Este fenômeno tem sido atribuído na literatura pela redução do número de sítios ativos com a elevação da temperatura (PERDOMO et al., 2009).

As constantes C e K aumentaram com o incremento da temperatura. A primeira está associada a diferentes potenciais químicos entre a monocamada e as camadas superiores e a segunda entre a água livre e as camadas superiores, sendo, com raras exceções, próximo, mas menor que a unidade, fato que constitui uma característica dessas isothermas (TIMMERMANN et al., 2001).

As isothermas de sorção de água do pó de graviola estão apresentadas na Figura 28. Nota-se o aumento do teor de água de equilíbrio com o incremento da atividade de água para um valor de temperatura constante. Esse comportamento se manifesta na forma de uma curva sigmoide, que reflete uma isoterma do Tipo III. Característica de alimentos ricos em compostos solúveis, tais como café, maçã, banana, e ricos em açúcares.

Segundo Cano-Higuita et al. (2015), em alimentos ricos em açúcares solúveis, tais como glicose, frutose e sacarose, para baixos valores de atividade de água, o aumento do teor de água de equilíbrio é lento, seguido de um aumento acentuado em valores intermediários e altos de atividade de água. Este comportamento é atribuído ao efeito predominante da interação solvente-soluto associado a dissolução dos açúcares (MOSQUERA et al., 2012).

O efeito da temperatura sobre as isothermas de sorção do pó de graviola também pode ser observado a partir da Figura 28. Em valores de atividade de água $< 0,7$ observa-se diminuição do teor de água de equilíbrio com o aumento da temperatura. Este fato se deve ao aumento do grau de desordem molecular da água ligada na superfície do produto. Com a variação da temperatura, a excitação das moléculas, bem como a distância e, por conseguinte, a atração entre as moléculas, também variam. Desta forma, a quantidade de água ligada muda com a variação na temperatura a uma dada umidade relativa (MOHSEIN, 1986), como resultado de modificações químicas e físicas. Entretanto, acima desse valor se observa um comportamento ímpar do teor de água de equilíbrio. Há uma tendência de inversão deste em atividades de água elevada com a elevação da temperatura. Segundo Goula et al. (2008), Gabas et al. (2007) e Lavoyer et al. (2013) isso é devido ao aumento da solubilidade dos açúcares presentes que contribuem para a sorção de água.

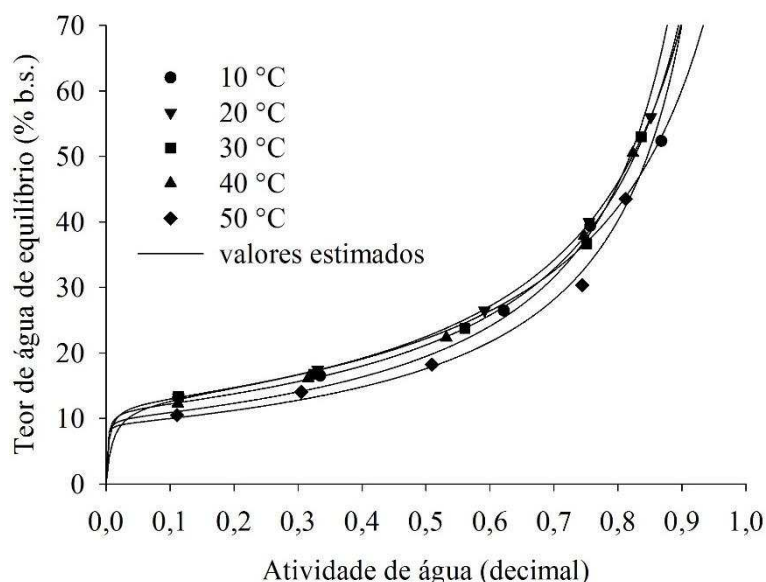


Figura 28: Isotermas de sorção de água do pó de graviola.

Analisando a Tabela 30 onde estão apresentados os parâmetros C_0 , K_0 , U_{m0} e as entalpias associadas ao modelo de GAB, pode-se notar valor positivo para a entalpia de U_{m0} , o que indica a ocorrência de reações endotérmicas. Como explica Oliveira et al. (2011), as reações absorvem energia do ambiente nos quais os produtos estão inseridos. Além disso, os autores afirmam que o maior valor de entalpia para esse parâmetro é esperado, uma vez que o teor de água da monocamada indica a quantidade de moléculas de água que estão fortemente ligadas a sítios específicos na superfície do produto, requerem maiores quantidades de energia para serem removidas.

Ainda analisando a Tabela 30 se observa valores negativos de entalpia para os parâmetros C_0 e K_0 . Estas representam a diferença do calor de sorção entre a monocamada e as multicamadas e do calor de vaporização da água e as multicamadas, respectivamente. O sinal negativo indica liberação de energia causada pelo aumento no nível de vibração das moléculas de água devido ao aumento das temperaturas de trabalho.

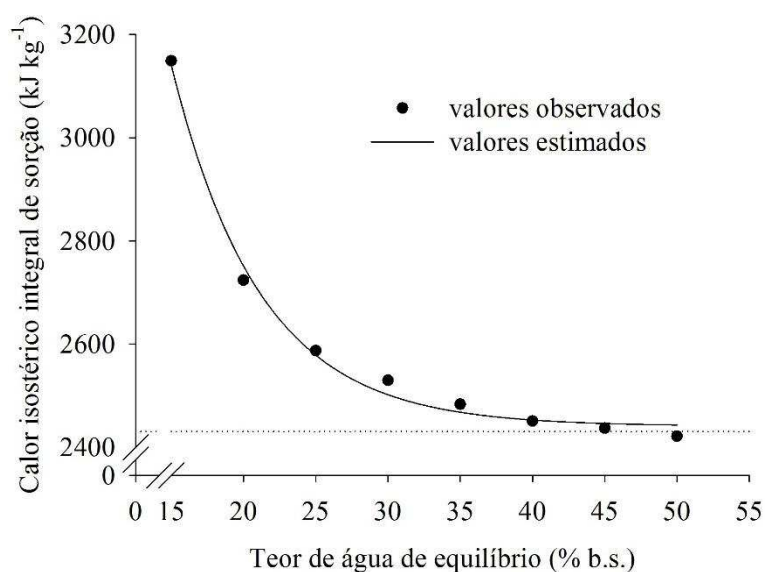
Tabela 30: C_0 , K_0 , U_{m0} e as entalpias associadas ao modelo de GAB

Parâmetros	Valores	Entalpias (kJ kg ⁻¹)
C_0	$45,455 \times 10^9$	-2581,035
K_0	2,0238	-107,758
U_{m0} (%b.s.)	0,8538	356,624

Pela Figura 29 observa-se aumento do calor isostérico integral de sorção com a diminuição do teor de água de equilíbrio. Essa mesma tendência é reportada na literatura por vários autores (PEDRO et al., 2010; ASCHERI et al. 2009; LIMA et al. 2008). Segundo Al-

Muhtaseb et al. (2004), em estágios iniciais de sorção (baixos teores de água), existem sítios polares altamente ativos, de elevada energia de interação na superfície do produto, os quais são cobertos com moléculas de água, formando uma camada monomolecular. Conforme as moléculas de água se ligam quimicamente aos sítios altamente ativos, a sorção passa a ocorrer em locais menos ativos (elevados teores de água), com menos energia de interação e, conseqüentemente, menor calor isostérico de sorção (PÉREZ-ALONSO et al., 2006).

O calor latente de vaporização que representa a quantidade mínima de energia necessária para evaporar as moléculas de água foi de 2430,50 kJ kg⁻¹. Nota-se pela Figura 29 que o calor isostérico integral de sorção foi sempre maior que o calor latente de vaporização até o teor de água de equilíbrio de 50% b.s. Isso ocorre pelo fato de a energia de ligação entre as moléculas de água aos sítios de sorção ser maior do que a energia de ligação das moléculas de água entre si na fase líquida (MASUZAWA e STERLING, 1968). A partir deste ponto, ele atinge um valor mínimo de 2421,289 kJ kg⁻¹, indicando que o calor isostérico líquido passa a ser negativo. Resultado semelhante foi reportado por Tsami (1991) e Kiranoudis et al. (1993). Esse valor ligeiramente negativo em teor de água de equilíbrio elevado ocorre pela dissolução endotérmica dos açúcares na água ligada, explica os autores.



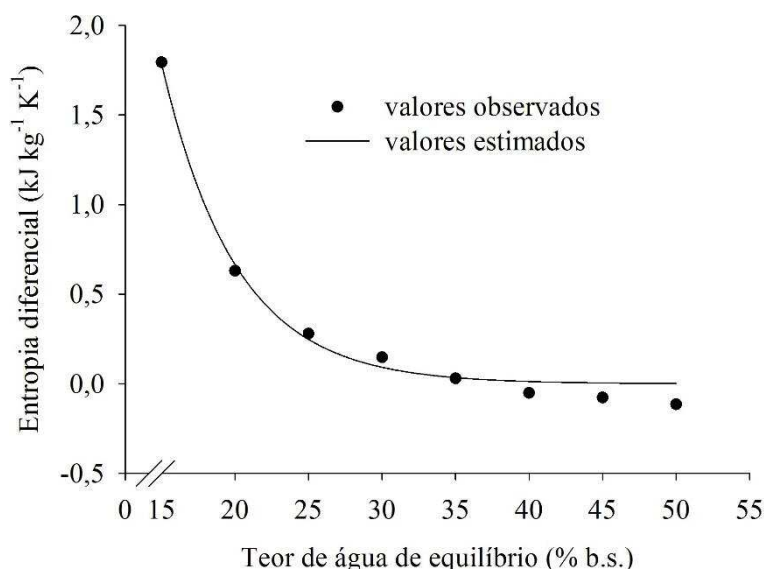
$$Q_{st} = 7230,405^* \times \exp(-0,154^* \times U_e)$$

$$R^2 = 99,34\%$$

Figura 29: Calor isostérico integral sorção de água do pó de graviola, equação de regressão em função do teor de água de equilíbrio (U_e) e o respectivo coeficiente de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Na Figura 30 estão os valores observados e estimados da entropia diferencial de sorção do pó de graviola em função do teor de água de equilíbrio.



$$\Delta S = 34,702^* \times \exp(-0,197^* \times U_e)$$

$$R^2 = 98,97\%$$

Figura 30: Entropia diferencial de sorção de água do pó de graviola, equação de regressão em função do teor de água de equilíbrio (U_e) e o respectivo coeficiente de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

A entropia diferencial apresentou a mesma tendência do calor isostérico integral de sorção, ou seja, diminuiu com o incremento do teor de água de equilíbrio. Resultado esperado, uma vez que essa propriedade termodinâmica é proporcional ao número de sítios de sorção disponíveis em um nível específico de energia (MADAMBA et al., 1996), indicando a perda de mobilidade das moléculas de água no produto.

Observam-se ainda valores negativos de entropia a partir do teor de água de equilíbrio de 40% b.s., indicando perda de mobilidade das moléculas de água durante a sorção. O mesmo foi relatado por Xiao e Tong (2013).

Mudança na energia livre de Gibbs durante a sorção de água entre o produto e o ambiente pode ser definida como a energia necessária para transferir as moléculas de água a partir do estado de vapor a uma superfície sólida, ou a partir de uma superfície sólida para o estado de vapor. Esta é a quantidade que pode ser considerada uma medida de trabalho realizado pelo sistema no processo de adsorção ou dessorção (KALEEMULLAH e KAILAPPAN, 2007). Os valores de energia livre de Gibbs diminuíram com o aumento do teor de água de equilíbrio e com a temperatura (Figura 31). O mesmo foi observado por Kaleemullah e Kailappan (2007), Oliveira et al. (2010), e Oliveira et al. (2011).

Ademais, pode-se constatar independente da temperatura, que a energia livre de Gibbs tende a um valor constante com o aumento do teor de água de equilíbrio.

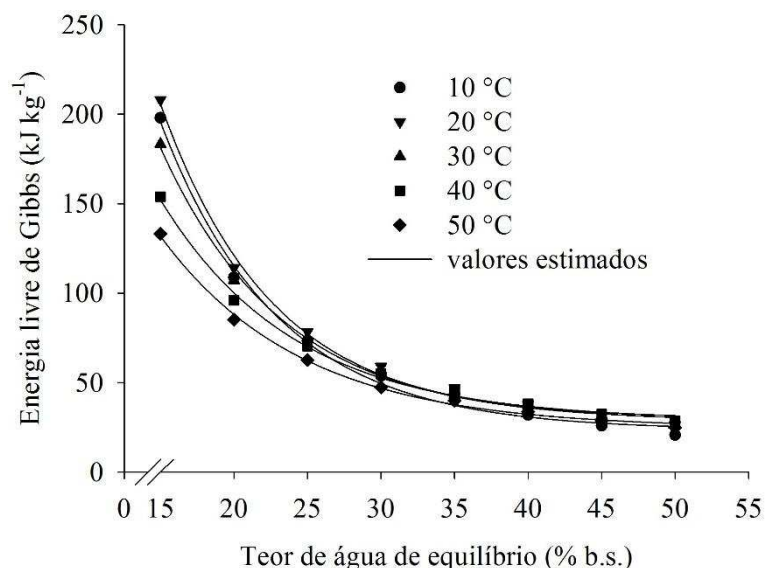


Figura 31: Energia livre de Gibbs do pó de graviola.

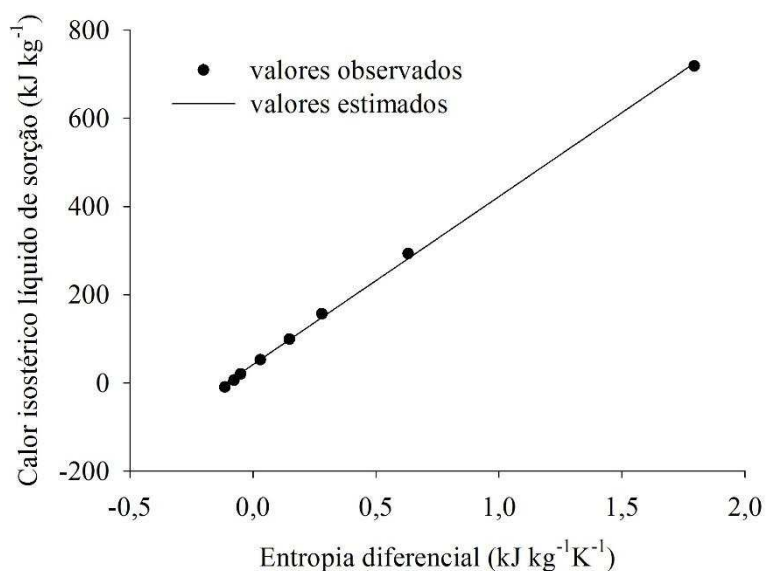
As equações de regressão da energia livre de Gibbs em função do teor de água de equilíbrio para cada temperatura, e seus coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 31. Observa bom ajuste dos modelos.

Tabela 31: Equações de regressão para a energia livre de Gibbs em função do teor de água de equilíbrio (U_e) para cada temperatura, e seus respectivos coeficientes de determinação.

Temperatura (°C)	Equação	R ² (%)
10	$\Delta G = 23,382^* + 1137,061^* \times \exp(-0,125^* \times U_e)$	99,57
20	$\Delta G = 29,780^* + 1259,856^* \times \exp(-0,131^* \times U_e)$	99,51
30	$\Delta G = 28,282^* + 922,281^* \times \exp(-0,119^* \times U_e)$	99,63
40	$\Delta G = 28,879^* + 640,578^* \times \exp(-0,109^* \times U_e)$	99,66
50	$\Delta G = 24,471^* + 516,140^* \times \exp(-0,104^* \times U_e)$	99,75

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

A correlação entre a entalpia-entropia para a sorção de água do pó de graviola está apresentada na Figura 32. A temperatura isocinética e a harmônica foram de 380,94 e 302,50 K, respectivamente confirmando a adequação da teoria isocinética. E uma vez a $T_B > T_{hm}$ o processo é controlado pela entalpia.



$$\Delta h_{st} = 380,94^* \times \Delta S + 41,60^*$$

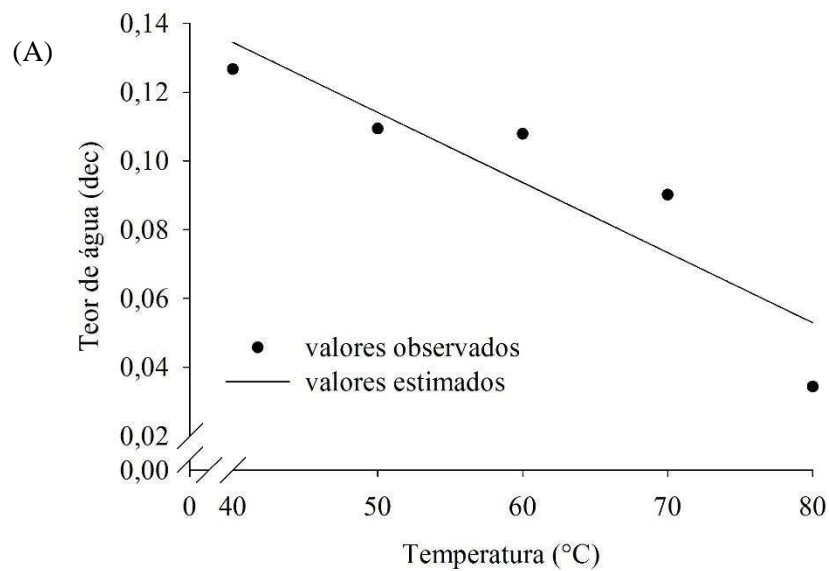
$$r^2 = 99,99\%$$

Figura 32: Correlação entre a entalpia e a entropia da sorção de água do pó de graviola, equação de regressão e o respectivo coeficiente de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

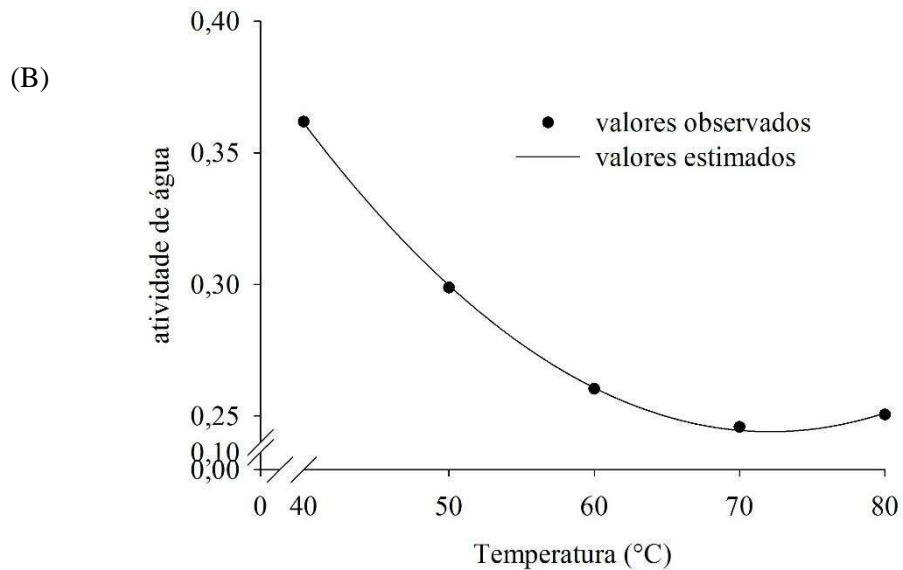
5.5. Propriedades físico-químicas do pó de graviola.

O efeito da temperatura de secagem sobre o teor de água e a atividade de água está apresentado nas Figuras 33A e 33B, respectivamente.



$$\hat{T\hat{A}} = -0,0020^{**} \times T + 0,2160^{*}$$

$$r^2 = 81,98\%$$



$$\hat{a}w = 0,0001^{*} \times T^2 - 0,0164^{*} \times T + 0,8359^{*}$$

$$R^2 = 99,97\%$$

Figura 33: Efeito da temperatura de secagem sobre o teor de água (A) e a atividade de água (B), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Observa-se a redução dessas com o incremento da temperatura de secagem e um bom ajuste do modelo linear e quadrático para o teor de água e a atividade de água, respectivamente. O uso de temperaturas mais altas implica em uma maior diferença de temperaturas entre o produto e o ar de secagem, acarretando uma maior transferência de calor e, conseqüentemente, uma maior evaporação de água do produto, resultando em teores de água e atividade de água mais baixos.

O teor de água do pó de graviola se manteve dentro dos padrões estabelecidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA para produtos desidratados. A Resolução RDC nº 272 de 22 de setembro de 2005 da ANVISA preconiza que produtos de frutas secos ou desidratados devem apresentar no máximo 25% de umidade (BRASIL, 2005a). Osório et al. (2011), relatam teor de água de $5,37 \pm 1,63$ e $2,75 \pm 1,72$ (g/100g) em polpas de goiaba em pó obtidas por secagem com ar quente e por liofilização, respectivamente. Tonon et al. (2009), estudando a influência da temperatura do ar de secagem nas propriedades físico-químicas do suco de açaí em pó observou resultado semelhante para o teor de água, o qual obteve valores de $2,56 \pm 0,17$; $1,45 \pm 0,10$ e $0,66 \pm 0,18$ (b.u.) para as temperaturas 138, 170 e 202 °C.

Os baixos valores dessas características físico-químicas do pó de graviola contribuem para conservação, uma vez que, valores de atividade de água entre 0,44 e 0,54, apresentam reduzida atividade enzimática e não ocorre o crescimento de fungos filamentosos, leveduras e bactérias (JAY, 2006).

O efeito da temperatura de secagem sobre a ATT e o pH está apresentado nas Figuras 34A e 34B, respectivamente.

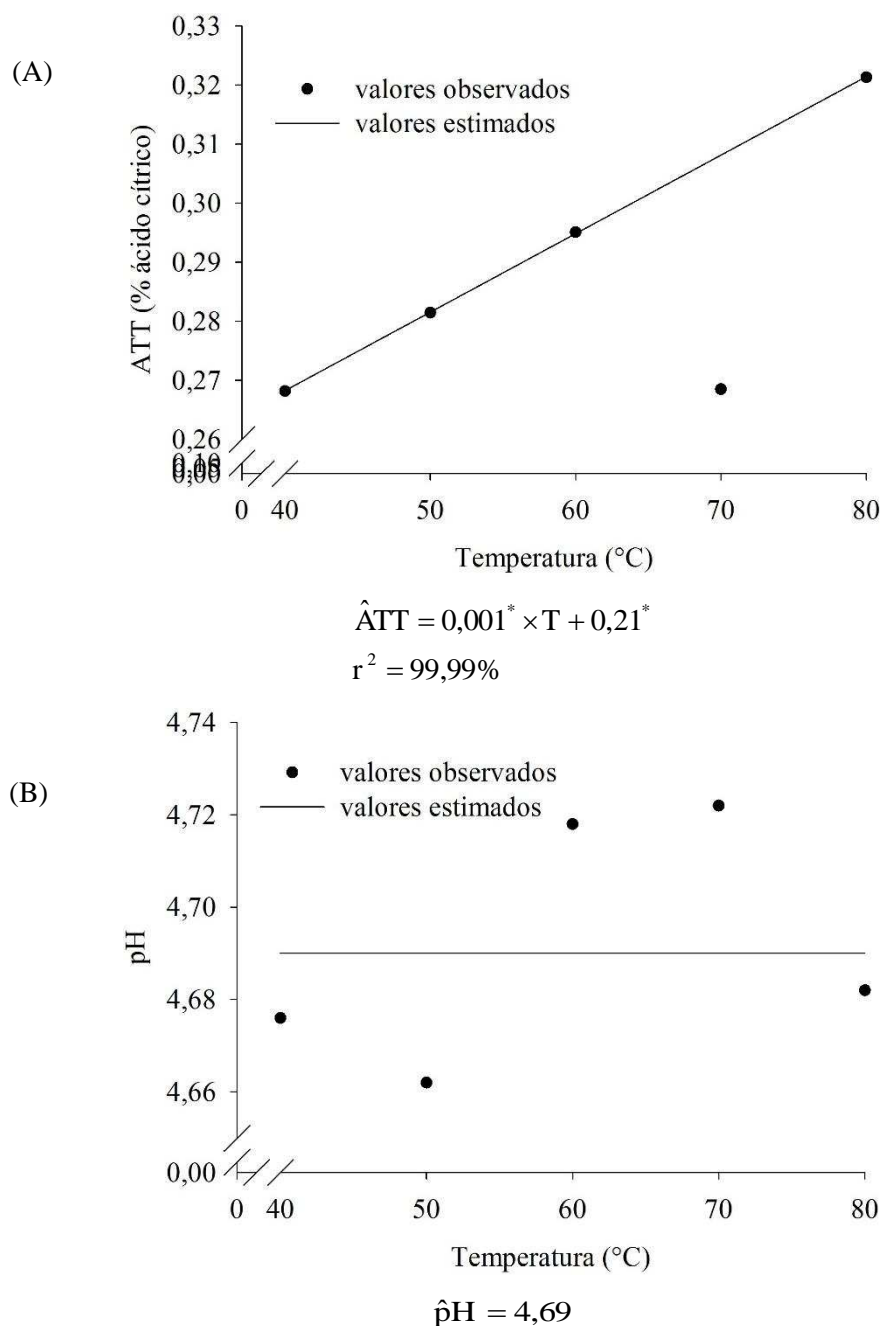


Figura 34: Efeito da temperatura de secagem sobre a ATT e pH, equações de regressão em função da temperatura (T) e o respectivo coeficiente de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

A ATT aumentou com a elevação da temperatura de secagem como esperado, devido a concentração de compostos proporcionado pela redução do teor de água. Além disso, observa-se bom ajuste do modelo linear.

Aos dados experimentais do pH (Figura 34B) não foi possível ajustar curva de regressão, sendo a média representada pela reta. Ademais, observa-se assim como a ATT o pH apresentou valores baixos. Estes juntamente com o teor de água e a atividade indicam que o pó de graviola

provavelmente não necessita de adição de conservantes para evitar o desenvolvimento de microrganismos.

Nas Figuras 35A, 35B e 35C está apresentado o efeito da temperatura de secagem sobre os SST, açúcares solúveis totais (AST) e açúcares redutores (AR), respectivamente.

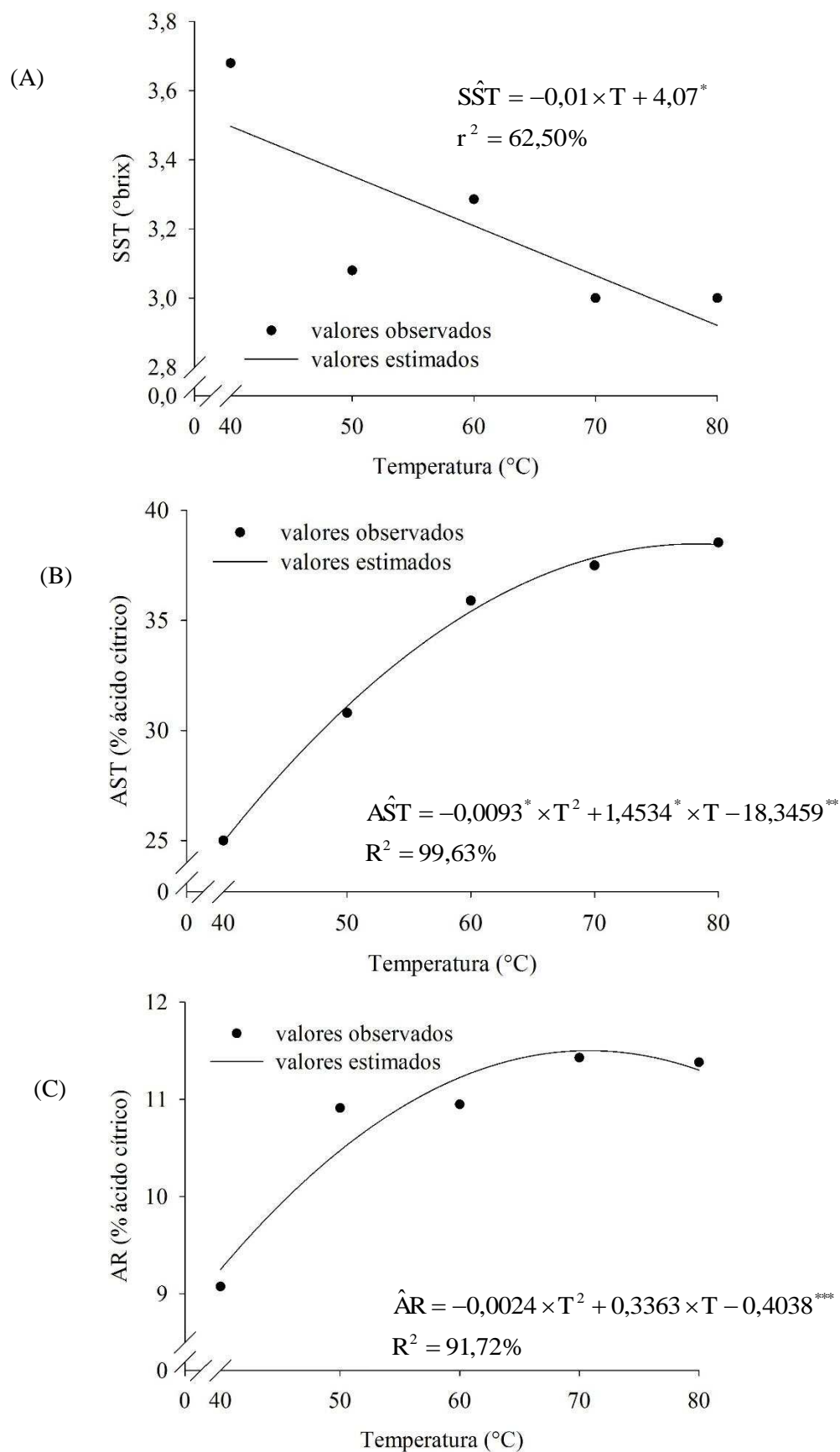


Figura 35: Efeito da temperatura de secagem sobre a ATT (A), AST (B) e AR (C), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

Os SST correspondem a todos os sólidos dissolvidos em água, como açúcares, sais, proteínas e ácidos, que são importantes compostos responsáveis pelo sabor e pela consequente aceitação por parte dos consumidores. Estes reduziram com o aumento da temperatura de secagem, o que não era esperado.

Os carboidratos são os macronutrientes mais abundantes em frutas e hortaliças. Eles são classificados em mono, oligo e polissacarídeos. Os monossacarídeos são açúcares simples não hidrolisáveis, enquanto os oligossacarídeos e polissacarídeos são formados por moléculas de monossacarídeos unidas por ligações hemiacetálicas (MALDONADE et al., 2013). Os monossacarídeos são açúcares redutores por apresentarem grupo carbonílico ou cetônico livre, capaz de ser oxidado na presença de agentes oxidantes em soluções alcalinas. Os oligo e polissacarídeos, que não possuem essa característica sem sofrerem hidrólise da ligação glicosídica, são denominados de açúcares não redutores (SILVA et al., 2003).

Nota-se que o teor de açúcares solúveis totais e açúcares redutores aumentou com a elevação da temperatura de secagem devido a concentração de compostos advindo da redução acentuada do teor de água. Ademais, nota-se um bom ajuste do modelo quadrático.

A cor é um atributo de importância fundamental no julgamento da qualidade de um alimento, uma vez que a apreciação visual é o primeiro dos sentidos a ser usado, sendo, portanto, uma característica decisiva na escolha e aceitação do produto (LIMA et al., 2007). O impacto visual gerado pela cor pode, muitas vezes, se sobrepor ao causado por outros atributos de aparência e odor. Pode ainda, apresentar efeito na própria intensidade com que é percebido o sabor (CARDOSO et al., 1997 citado por SILVA 2012).

O aumento da luminosidade com a elevação da temperatura de secagem pode ser constatado na Figura 36A, até a temperatura de 60 °C. A partir desse ponto seu valor decresce porque ocorre a concentração de compostos devido à redução mais acentuada do teor de água. Ramallo e Mascheroni (2012) não obtiveram variações significativas na coordenada L^* de fatias de abacaxi desidratadas, tendo seu valor médio de $69,26 \pm 2,92$.

Com relação à coordenada a^* (Figura 36B), verificou-se sua diminuição com o aumento da temperatura de secagem, contudo essa permaneceu positiva, indicando a cor como pouco vermelha.

A coordenada b^* (Figura 36C) aumentou com a elevação da temperatura de secagem, indicando maior intensidade da cor amarela. Entretanto, apresentou valores ligeiramente menores aos valores médios ($29,11 \pm 1,58$) reportados por Ramallo e Mascheroni (2012).

Os modelos ajustados aos dados experimentais das coordenadas L^* , a^* e b^* em função da temperatura apresentaram bons ajustes com coeficientes de determinação de 98,10, 85,32 e 97,93%, respectivamente e significância dos coeficientes de regressão.

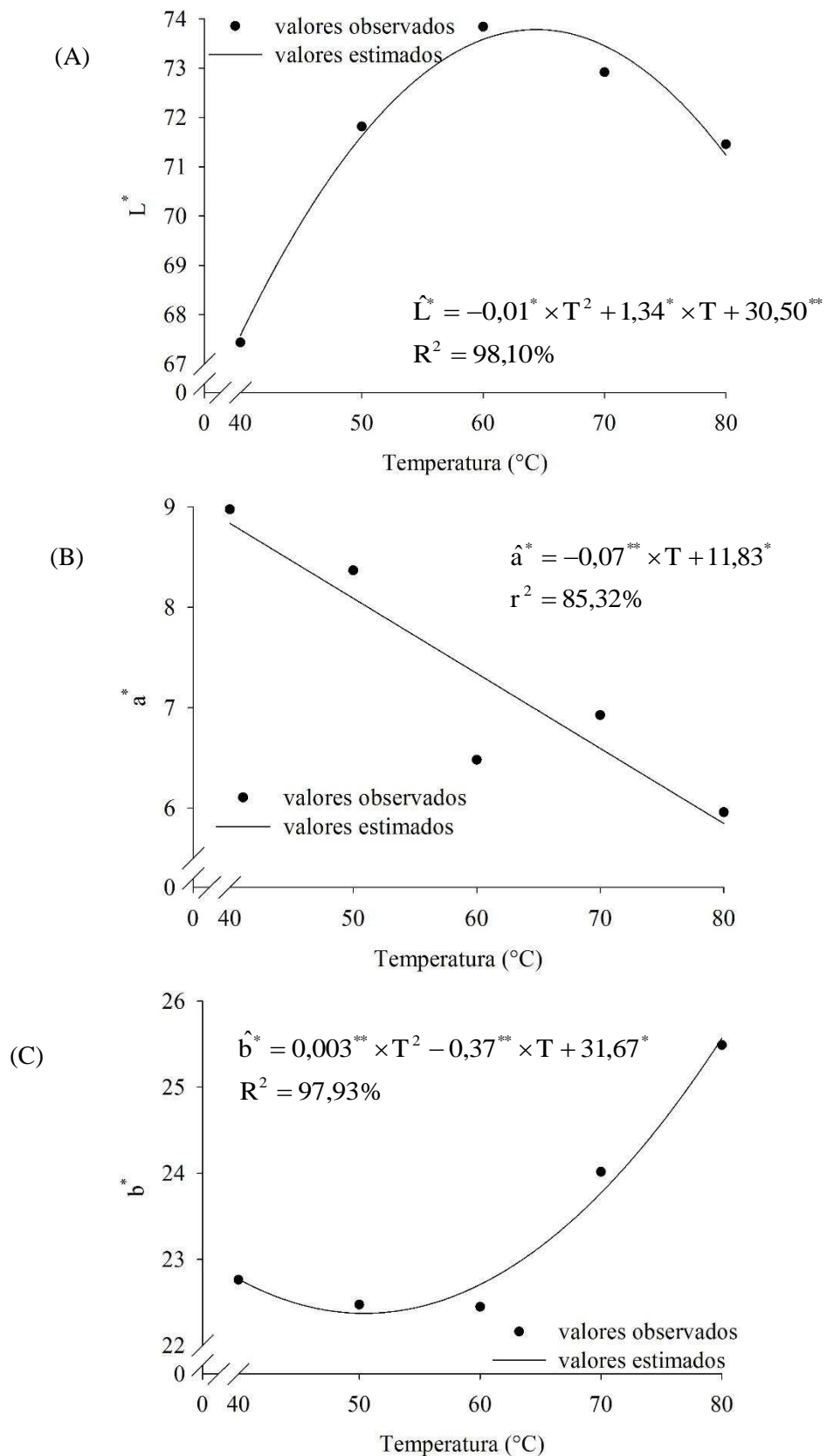


Figura 36: Efeito da temperatura de secagem sobre as coordenadas L^* (A), a^* (B) e b^* (C), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

O aspecto geral de um produto é a combinação da luminosidade, do ângulo hue e do croma. É a combinação desses três atributos produz um impacto visual aos olhos humanos.

A tonalidade cromática ou matiz (Figura 37A) foi o parâmetro que apresentou as mudanças mais significativas com a secagem. Verificou-se seu aumento com a elevação da temperatura de secagem de 68,51 para 76,83, indicando uma tendência de amarelo-alaranjado para o pó.

A saturação (Figura 37B) teve um comportamento quadrático com temperatura de secagem ($R^2=91,66\%$). Seus valores foram de 24,48 a 26,18. Ligeiro aumento, mostrando estabilidade da cor. Esses valores foram semelhantes aos encontrados por Ramallo e Mascheroni (2012) na secagem de abacaxi.

O índice de escurecimento (BI) (Figura 37C) diminuiu com a elevação da temperatura de secagem até a temperatura de 60 °C, a partir de então aumentou, apontando maior escurecimento do pó de graviola.

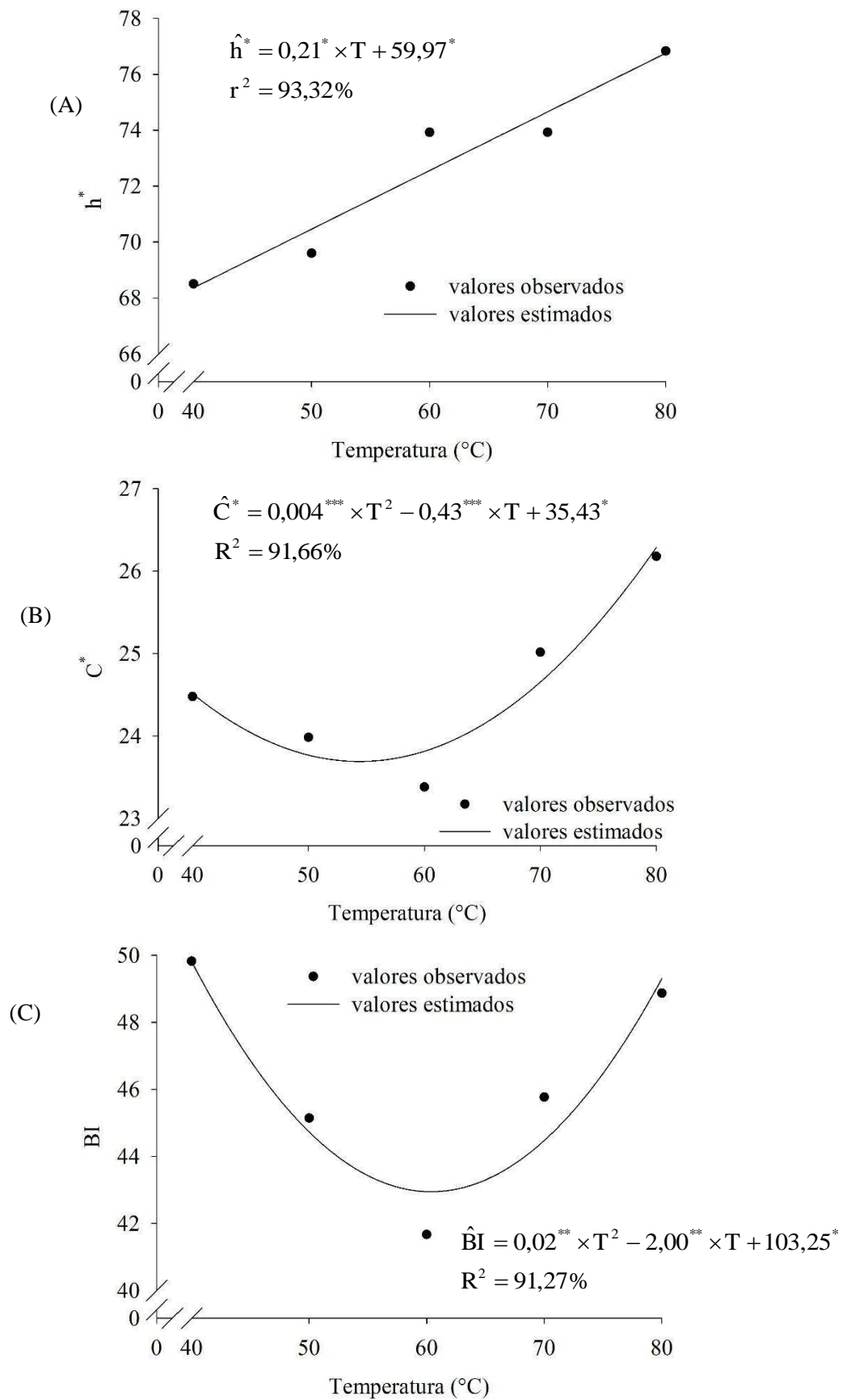
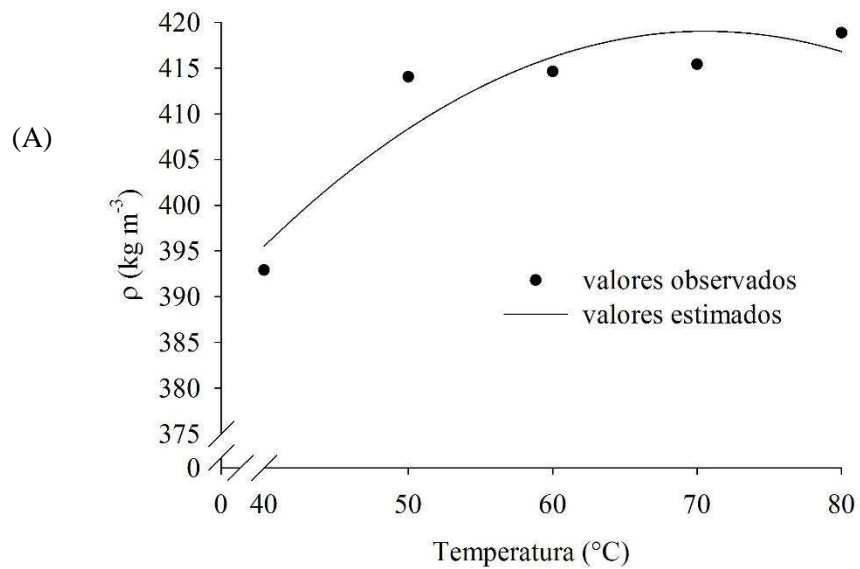


Figura 37: Efeito da temperatura de secagem sobre h^* (A), C^* (B) e BI (C), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

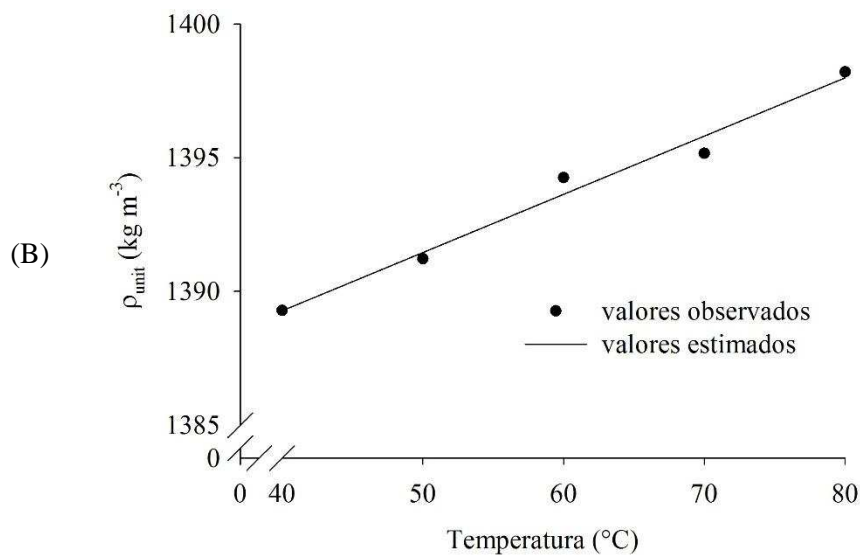
A influência da temperatura de secagem sobre massa específica aparente está apresentada na Figura 38A. A massa específica aparente é a razão entre a massa do sólido e o volume do sólido contendo poros. Observa-se o aumento desta com o incremento da temperatura de secagem e um bom ajuste do modelo quadrático. Essa tendência não era esperada, uma vez que nas maiores temperaturas o teor de água foi menor, resultando em maiores valores de massa específica aparente. Entretanto, com o aumento da temperatura de secagem, observou-se visualmente que a granulometria reduziu. Em um dado volume constante, partículas mais finas se aglomeram mais intensamente, resultando numa massa maior para aquele volume, ao passo que para partículas maiores há uma menor aglomeração, culminando em menor massa e, conseqüentemente, menores valores de massa específica aparente. Resultado semelhante para a massa específica aparente foi constatado por Carvalho (2014), estudando a produção de polpa de abóbora em pó pelo processo de secagem em leito de espuma.

A massa específica unitária ou real (Figura 38B) representa a relação entre a massa de sólido e o volume ocupado pelo produto, excluindo-se os poros abertos e os fechados, assim como os demais espaços vazios (BRITO et al., 2012). Esta variou de 1389,2887 a 1398,2161 kg m⁻³. Apresentou uma relação linear com a temperatura de secagem e coeficiente de determinação de 98,11%.



$$\hat{\rho} = -0,0251^{***} \times T^2 + 3,5507^{***} \times T + 293,7158^{**}$$

$$R^2 = 86,42\%$$



$$\hat{\rho}_{\text{unit}} = 0,2180^* \times T + 1380,5533^*$$

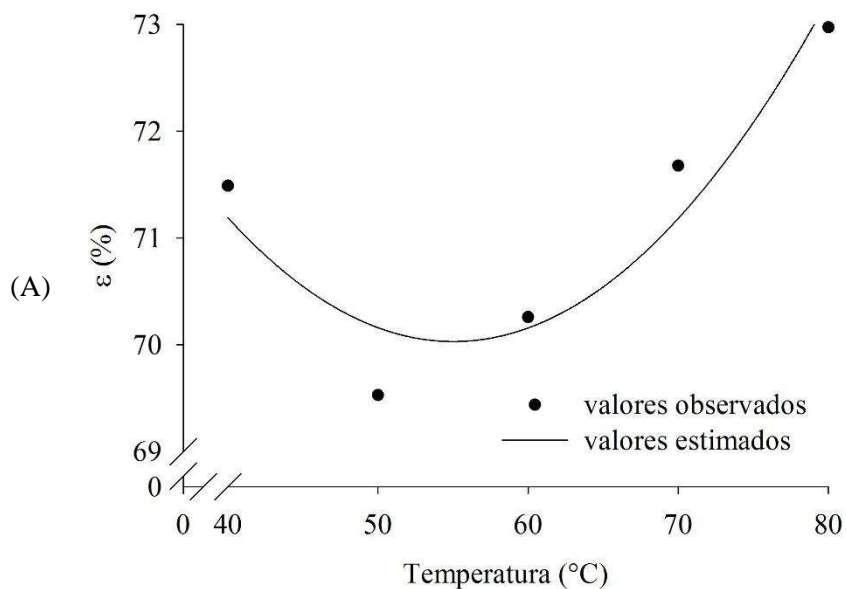
$$r^2 = 98,11\%$$

Figura 38: Efeito da temperatura de secagem sobre a massa específica aparente (A) e unitária (B), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

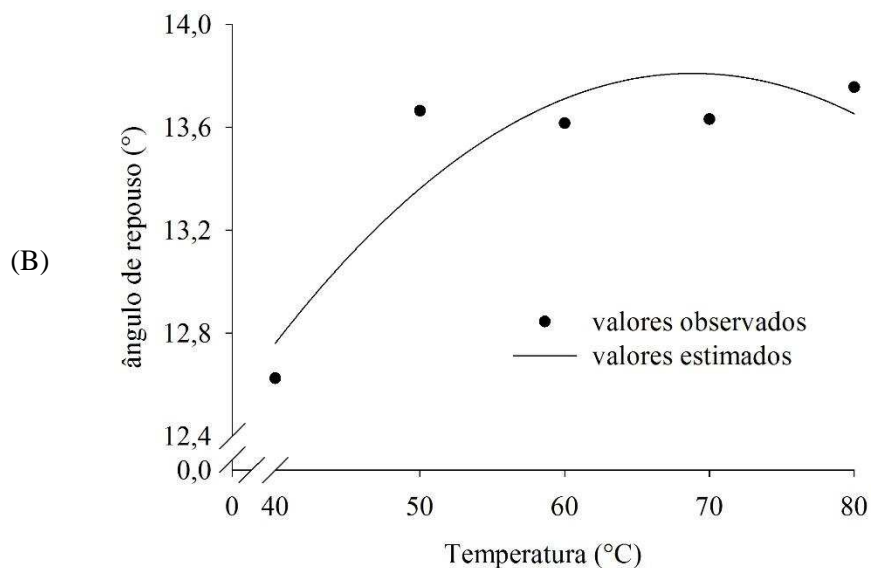
A porosidade do pó de graviola (Figura 39A) sofreu mínima influência da temperatura de secagem e apresentou valores entre 71,71 e 70,04%. Nas maiores temperaturas de secagem esta teve um ligeiro aumento, certamente pela granulometria mais fina do pó. Schubert (1987) relata que a porosidade aumenta com o decréscimo do tamanho das partículas devido à adesão entre partículas permitir uma estrutura desprendida da massa.

Os valores do ângulo de repouso do pó de graviola (Figura 39B) aumentaram com a elevação da temperatura de secagem. Como já reportado, nas maiores temperaturas o pó apresentou granulometria mais fina logo, confirmou-se que partículas menores permitem o incremento do número total destas na massa de produto, aumentando as forças de coesão entre produto/produto (GELDART et al., 2009), favorecendo assim maior estabilidade para a massa de produto, culminando na formação de maiores taludes.



$$\hat{\varepsilon} = 0,0051^{***} \times T^2 - 0,5659^{***} \times T + 85,6002^*$$

$$R^2 = 88,60\%$$



$$\hat{\alpha} = -0,001 \times T^2 + 0,17 \times T + 7,83^{***}$$

$$R^2 = 81,76\%$$

Figura 39: Efeito da temperatura de secagem sobre a porosidade (A) e o ângulo de repouso (B), equações de regressão em função da temperatura (T) e os respectivos coeficientes de determinação.

* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ** Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; *** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

6. CONCLUSÕES

Ao estudar e caracterizar o processo de produção de graviola em pó através da secagem em leito de espuma constatou-se que:

1. As propriedades físico-químicas das espumas indicam que as alterações apresentadas não comprometem a possível secagem em leito de espuma do produto.
2. A albumina na concentração de 7,43% foi o melhor emulsificante para a produção de espuma de graviola uma vez que atendeu aos critérios de massa específica, expansão e estabilidade.
3. O modelo de Midili se ajustou bem aos dados experimentais da secagem de espuma de graviola sendo, portanto apto a descrever o fenômeno em estudo.
4. O modelo proposto para determinar o ponto de transição entre o período de taxa de secagem constante e o de taxa de secagem decrescente ajustou-se bem aos dados experimentais podendo servir como uma ferramenta para determinar o teor de água crítico e o tempo crítico.
5. Obteve-se acréscimo no coeficiente de difusão efetiva com a elevação da temperatura de secagem e energia de ativação de $33,10 \text{ kJ mol}^{-1}$.
6. Os modelos de GAB, Halsey modificado e Sigma-Copace são aptos para descrever o fenômeno de sorção de água do pó de graviola.
7. As propriedades termodinâmicas apresentaram comportamento ímpar devido aos elevados teores de açúcares encontrado no pó.
8. As propriedades físico-químicas do pó de graviola indicam boa estabilidade do produto obtido pelo método de secagem em leito de espuma.

7. PERPECTIVAS FUTURAS

A secagem em leito de espuma é uma técnica promissora de processamento que pode ser usada para desidratar alimentos líquidos e semi-líquidos como polpa de frutos e hortaliças em substituição aos tradicionais métodos de secagem destes tipos de alimentos, o spray dryer e a liofilização, visto que é mais barata e preserva melhor as propriedades físico-químicas do produto final. Podendo ser implementada nas pequenas e médias indústrias, evitando perdas e possibilitando a oferta de um novo produto ao mercado consumidor. Com isso, aumentando a renda das pessoas envolvidas.

8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and Bioproducts Processing**, v. 80, n. 2, p. 118 - 128, 2002.

AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 135-142, 2004.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de alimentos: teoria e prática**. 5ª edição, atualizada e ampliada. Editora UFV. Viçosa-MG, 2011, 601 p.

ASCHERI, D. P. R.; MOURA, W. S.; ASCHERI, J. L. R.; JUNIOR, E. A. F. Propriedades termodinâmicas de adsorção de água do amido de rizomas do lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 2, p. 454-462, 2009.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. Washington: AOAC International, 2002.

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; VARGAS-ELÍAS, G. A.; FERNANDES, L. S.; CARVALHO, M. S. **Cinética de sorção de água do café torrado e moído**. In: VIII Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2013, Salvador, Anais...Salvador, 2013, p.1-6.

BARMORE, M. A. The influence of chemical and physical factors on egg-white foams. **Colorado Agricultural College**, Colorado Experiment Station Technology Bulletin, 9, p.1-58, 1934.

BARRETO, I. M. A. **Caracterização da polpa de pitanga roxa (*Eugenia uniflora*) desidratada em leito de espuma**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 68p., 2011.

BASTOS, D. da S.; SOARES, D. M. B. G.; ARAÚJO, K. G. de L.; VERRUMA-BERNARDI, M. R. Desidratação da Polpa de Manga “Tommy Atkins” Utilizando a Técnica de “Foam-Mat Drying” - Avaliações Químicas, Físico-químicas e Sensoriais. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 4, p. 283-290, 2005.

BERISTAIN, C. I.; GARCIA, H. S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 405-415, 1996.

BERISTAIN, C. I.; CORTÉS, R.; CASILLAS, M. A.; DÍAZ, R. Obtención de jugo de piña em polvo por el método desecado por espumas. **Archivos Latino americanos de Nutrición**, v.41, n.2, p.238-245, 1991.

BRASIL - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC n. 272, de 22 de setembro de 2005. Dispõe sobre o “Regulamento Técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis”, **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2005a.

BRASIL - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 42 de 16 de dezembro de 2010. **Diário Oficial da União**. Nº 241, sexta-feira, 17 de dezembro de 2010.

BRASIL – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa Nº 24, de 08 de Setembro de 2005. Manual Operacional de Bebidas e Vinagres. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 set. 2005b. Seção 1, p.11.

BRITO, J. G.; SILVA, E. F. M.; COSTA, T. L.; ROCHA, A. P. T.; SILVA, O. S. Propriedades físicas do cominho em pó comercializado nas feiras livres da Paraíba. **Revista Verde**, v. 7, n. 1, p. 206–211, 2012.

BROCK, J.; NOGUEIRA, M. R.; ZAKRZEWSKI, C.; CORAZZA, F. C.; CORAZZA, M. L.; OLIVEIRA, J. V. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 564-570, 2008.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450p.

CAMPBELL, G. M.; MOUGEOT, E. Creation and characterisation of aerated food products. **Trends in Food Science & Technology**, v.10, p. 283 - 296, 1999.

CANO-HIGUITA, D. M.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H. A.; TELIS, V. R. N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: A thermodynamic approach. **Food and Bioproducts Processing**, v.93, p. 19-28, 2015.

CANUTO, G. A. B.; XAVIER, A. A. O.; NEVES, L. C.; BENASSI, M. T. Caracterização físico-química de polpas de frutos da Amazônia e sua correlação com atividade anti-radical livre. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 4, p. 1196-1205, 2010.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. 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, 2012.

CAPITANI, C. D. **Interação de proteínas do soro de leite com polissacarídeo: fracionamento e estudo das propriedades funcionais dos complexos**. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição). Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 2004.

CARDOZO, C. J. M.; LOZANO, V. V.; BETANCUR, D. P. Y.; VELÁSQUEZ, H. J. C.; VALENZUELA, J. R. C. Physiological and physico-chemical characterization of the soursop fruit (*Annona muricata* L. cv. Elita). **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, v.65, n. 1, p. 6477-6486, 2012.

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

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; ALSEMO, G. C. S.; RODRIGUES, E.; GUEDES, M. A.; CAVALCANTI, A. S. R. R. M.; OLIVEIRA, C. C. A. Obtenção de graviola em pó pelo processo de liofilização. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 2, p. 165-172, 2005.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea Arábia* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

CRUZ, L. S. **Caracterização física e química da casca, polpa e semente de atemoia ‘Gefner’**. Dissertação (Mestrado em Agroquímica). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 62 p., 2011.

DAI, Y.; HOGAN, S.; SCHMELZ, E. M.; JU, Y. H.; CANNING, C.; ZHOU, K. Selective growth inhibition of human breast cancer cells by graviola fruit extract in vitro and in vivo involving down regulation of EGFR expression. **Nutrition and Cancer**, v.63, n.5, p. 795-801, 2011.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4ª edição, Editora: Artmed. Porto Alegre, 2010, 900p.

DAVIS, J. P.; FOEGEDING, E. A. Comparisons of the foaming and interfacial properties of whey protein isolate and egg white proteins. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 54, p. 200-210, 2007.

DITCHFIELD, C. **Estudo dos métodos para a medida da atividade de água**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 736 p.

FELLOWS, P. **Food processing technology: principles and practice**. 2 ed. New York, USA: CRC Press. 2006. cap. 15, p. 309-340.

FERREIRA, L. E.; CASTRO, P. M. N.; CHAGAS, A. C. S.; FRANÇA, S. C.; BELEBONI, R. O. In vitro anthelmintic activity of aqueous leaf extract of *Annona muricata* L. (Annonaceae) against *Haemonchus contortus* from sheep. **Experimental Parasitology**, v. 134, n. 3, p.327-332, 2013.

FIGUEIRÊDO, G. R. G.; VILASBOAS, F. S.; OLIVEIRA, S. J. R.; SODRÉ, G. A.; SACRAMENTO, C. K. Propagação da gravioleira por miniestaquia. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 3, p. 860-865, 2013.

FLORENCE, N. T.; BENOIT, M. Z.; JONAS, K.; ALEXANDRA, T.; DÉsirÉ, D. D. P.; PIERRE, K.; THÉOPHILE, D. Antidiabetic and antioxidant effects of *Annona muricata* (Annonaceae), aqueous extract on streptozotocin-induced diabetic rats. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 151, n. 2, p. 784-790, 2014.

FREITAS, A. L. G. E.; VILASBOAS, F. S.; PIRES, M. M.; JOSÉ, A. R. S. Caracterização da produção e do mercado da graviola (*Annona muricata* L.) no estado da Bahia. **Informações Econômicas**, v. 43, n. 3, p. 1-12, 2013.

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

GABAS, A. L.; TELIS, V. R. N.; SOBRAL, P. J. A.; TELIS-ROMERO, J. Effect of maltodextrin and arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 246-252, 2007.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; VERLINDEN, A. Characterisation of dry powders. **Powder technology**, v. 190, n. 1-2, p. 70-74, 2009.

GERMAN, J. B.; O'NEILL, T. E.; KINSELLA, J.E. Film forming and foaming behavior of food proteins. **Journal of the American Oil Chemistry Society**, v.62, n.9, p.1358-1366, 1985.

GOULA, A. M.; KARAPANTSIOS, T. D.; ACHILIAS, D. S.; ADAMOULOPOLOS, K. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 1, p. 73-83, 2008.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v.81A, n.1, p.89-96, 1977.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v. 11, p. 109-116, 1976.

JAY, J. M. **Microbiologia de alimentos**. Artmed, ed. 6, Porto Alegre, 2006.

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

KALEEMULLAH, S.; KAILAPPAN, R. Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. **Journal of Stored Products Research**, v. 43, p. 104-110, 2007.

KANDASAMY, P.; VARADHARAJU, N.; KALEMULLAH, S.; MOITRA, R. Production of papaya powder under foam-mat drying using methyl cellulose as foaming agent. **Asian Journal of Food and Agro-Industry**. v.5, n. 5, p. 374-387, 2012.

KARIM, A. A.; WAI, C. C. Characteristics of foam prepared from star fruit (*Averrhoa carambola* L.) puree by using methyl cellulose. **Food Hydrocolloids**, v. 13, p. 203-210, 1999.

KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, **Journal of Food Engineering**, v. 20, p.55-74, 1993.

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 1 - Some fundamental statistical problems associated with the analysis of Van't Hoff and Arrhenius data. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, p. 2335-2341, 1976a.

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 2 - Separation of the chemical from the statistical effect. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, p. 2341-2351, 1976b.

LAVOYER, F. C. G.; GABAS, A. L.; OLIVEIRA, W. P.; TELIS-ROMERO, J. Study of adsorption isotherms of green coconut pulp. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 1, p. 68-74, 2013.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de Bioquímica**. 3ª edição. Editora Sarvier. São Paulo, 1995, 839 p.

LEVINE, I. N. **Físico-química**. 5ª edição - Madri: McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U., v. 1, 513p., 2004.

LIMA, A. W. O.; ANGNES, L. Biocatálise em meio aquo-restritos: fundamentos e aplicação em química analítica. **Química Nova**, v. 22, n. 2, p. 229 - 245, 1999.

LIMA, E. E.; SILVA, A. S.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Estudo das isotermas e calor isostérico de adsorção da farinha da coroa de frade. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 10, n. 2, p. 163-170, 2008.

LIMA, V. L. A. G.; MÉLO, E. A.; GUERRA, N. B. Correlação entre o teor de antocianinas e caracterização cromática de polpas de diferentes genótipos de aceroleira. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 10, n. 1, p. 51-55, 2007.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 109-119, 1996.

MALDONADE, I. R.; CARVALHO, P. G. B.; FERREIRA, N. A.; MOULIN, B. S. F. Protocolo para determinação de açúcares redutores pelo método de Somogyi-Nelson. Embrapa. **Comunicado Técnico 86**, 4p, 2013.

MALTINI, E.; TORREGGIANI, D.; VENIR, E.; BERTOLO, G. Water activity and the preservation of plant foods. **Food Chemistry**, v. 82, p. 79 - 86, 2003.

MANICA, I. Taxonomia ou sistemática, morfologia e anatomia. In: MANICA, I. **Fruticultura - cultivo das anonáceas: ata, cherimólia e graviola**. Porto Alegre: EVANGRAF, 1997. p. 3-11.

MARCELLINI, P. S.; CORDEIRO, C. E.; FARAONI, A. S.; BATISTA, R. A.; RAMOS, A. L. D.; LIMA, A. S. Comparação físico-química e sensorial da atemóia com a pinha e a graviola produzidas e comercializadas no estado de Sergipe. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 14, n. 2, p. 187-189, 2003.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; MELO, E. C.; BARBOSA, F. F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 9, n. 1, p. 68-72, 2007.

MASUZAWA, M.; STERLING, C. Gel-water relation ships in hydrophilic polymers: thermodynamics of sorption of water vapour. **Journal of Polymer Science**, v. 12, p. 20-23, 1968.

MEDEIROS, M. L.; LANNES, S. C. S. Propriedades físicas de substitutos do cacau. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, supl.1, p. 243-253, 2010.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 891p.

MOSCA, J. L.; CAVALCANTE, C. E. B.; DANTAS, T. M. **Características botânicas das principais anonáceas e aspectos fisiológicos de maturação**. Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, 2006, 28p.

MOSQUERA, L. H.; MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Critical water activity and critical water content of freeze-dried strawberry powder as affected by maltodextrin and Arabic gum. **Food Research International**, v. 47, p. 201-206, 2012.

NARSIMHAN G. A model for unsteady state drainage of static foam. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 139-165, 1991.

OJEDA DE RODRÍGUEZ, G.; CORONADO, J.; NAVA, R.; SULBARÁN, B.; ARAUJO, D.; CABRERA, L. Caracterización físicoquímica de la pulpa de la guanábana (*Annona muricata*) cultivada en el occidente de Venezuela. **Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas**, v. 41, n. 2, p. 151-160, 2007.

OLIVEIRA, G. H. H; CORRÊA, P. C; ARAÚJO, E. F; VALENTE, D. S. M; BOTELHO, F. M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45; p. 546-554, 2010.

OLIVEIRA, G. H. H; CORRÊA, P. C; SANTOS, E. S; TRETTO, P. C; DINIZ, M. D. M. S. Evaluation of thermodynamics properties using GAB model to describe the desorption process cocoa beans. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 46; p. 2077-2084, 2011.

OSÓRIO, C; CARRIAZO, J. G.; BARBOSA, H. Thermal and structural study of guava (*Psidium guajava* L) powders obtained by two dehydration methods. **Química Nova**, v. 34, n. 4, p. 636-640, 2011.

PALMA, E. J.; CICHELO, M. S. F.; PAVANELLI, A. P. Emulsificantes em panificação. **Artigo Técnico**, n. 6, p. 1-7, 2004.

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

PEDRO, M. A. M.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Effect of drying method on the adsorption isotherms and isosteric heat of passion fruit pulp powder. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 4, p. 993-1000, 2010.

PERDOMO, J.; COVA, A.; SANDOVAL, A. J.; GARCÍA, L.; LAREDO, E.; MÜLLER, A. J. Glass transition temperatures and water sorption isotherms of cassava starch. **Carbohydrate Polymers**. v. 76, p. 305-313, 2009.

PÉREZ-ALONSO, C.; BERISTAIN, C. I.; LOBATO-CALLEROS, C.; RODRÍGUEZ-HUEZO, M. E.; VERNON-CARTER, E. J. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 753-760, 2006.

PERNELL, C. W.; FOEGEDING, E. A.; SORTE, P. J.; DAVIS, J. P. Properties of whey and egg white protein foams. **Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 204, p. 9-21, 2002.

PIAIA, J. C. Z. **Secagem de linguiça calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 129 p., 2009.

PINELI, L. L. O.; MORETI, C. L.; ALMEIDA, G. C.; NASCIMENTO, A. B. G.; ONUKI, A. C. A.; Associação de atmosfera modificada e antioxidantes reduz o escurecimento de batatas ‘Ágata’ minimamente processadas. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.4, p.993-999, out./dez., 2005.

PINTO, A. C. de Q. Taxonomy and botany. In: PINTO, A. C. de Q; CORDEIRO, M. C. R.; de ANDRADE, S. R. M.; FERREIRA, F. R.; FILGUEIRAS, H. A. de C.; ALVES, R. E.; KINPARA, D. I. **Annona species**. Southampton: International Centre for Underutilised Crops, 2005. p. 3-18.

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

PRASETYANINGRUM, A.; DJAENI, M. Drying spirulina with foam mat drying at medium temperature. **International Journal of Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 1-3, 2012.

RAJKUMAR, P.; KAILAPPAN, R.; VISWANATHAN, R.; RAGHAVAN, G. S. V.; Drying characteristics of foamed alphonso mango pulp in a continuous type foam mat dryer. **Journal of Food Engineering**, v.79, n.4, p.1452-1459, 2007.

RAMALLO, L. A.; MASCHERONI, R. H. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v.90, p.275–283, 2012.

REIS, R. C.; CÔRREA, P. C.; DEVILLA, I. A.; SANTOS, E. S.; ASCHERI, D. P. R.; SERVULO, A. C. O.; SOUZA, A. B. M. Drying of yam starch (*Discorea ssp.*) and glycerol filmogenic solutions at different temperatures. **Food Science and Technology**. v. 50, p. 651-656, 2013.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética de secagem de clones de café (*Coffea canefora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 2, p. 247-256, 2010.

RIBEIRO, E. P.; SERAVALLI, E. A. G. **Química de Alimentos**. 2ª edição, Editora Blucher. São Paulo, 2008, 184 p.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Academic Press, p. 223-309, 1995.

SACRAMENTO, C. K.; FARIA, J. C.; CRUZ, F. L.; BARRETO, W. S.; GASPAR, J. W.; LEITE, J. B. V. Caracterização física e química de frutos de três tipos de gravioleira (*Annona muricata* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 2, p. 329-331, 2003.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; DE MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 168-175, 2007.

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

SARICOBAN, C.; YILMAZ, M.T. Modelling the effects of processing factors on the changes in colour parameters of cooked meatballs using response surface methodology. **World Applied Sciences Journal**. v.9, n.1, p.14-22, 2010.

SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. **Journal of Food Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-32, 1987.

SEGURA, E.; MONROY, L. A.; MANRIQUE, G. Aplicacion de la tecnologia de deshidratacion por el metodo de secado de espumas (Foam-mat) em jugos de frutas tropicales II (naranja, piña, mora y maracuyá). **Revista Colombiana de Ciencias Quimico-Farmacéuticas**, n.18, p.47-52, 1990.

SHAW, D.J. **Introduction to Colloid and Surface Chemistry**. London: Elsevier. Digital printing. 306p. 2003.

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

SILVA, L. C. A. **Efeito da desidratação osmótica assistida por ultrassom no processamento de secagem convectiva de abacaxi pérola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 98p., 2012.

SILVA, R. N.; MONTEIRO, V. N.; ALCANFOR, J. A.X.; ASSIS, E. M.; ASQUIERI, E. R. Comparação de métodos para a determinação de açúcares redutores e totais em mel. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, n. 3, p. 337-341, 2003.

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

SOARES, E. C.; OLIVEIRA, G. S. F.; MAIA, G. A.; MONTEIRO, J. C. S.; SILVA JR., A.; FILHO, M. S. S. Desidratação da polpa de acerola (*Malpighia marginata* D.C.) pelo processo Foam Mat. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.21, n.2, p. 164-17, 2001.

SOBRINHO, R. B. **Potencial de exploração de anonáceas no nordeste do Brasil**. Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, 2010, 27p.

SOUZA, J. S. **Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro**. (Tese de doutorado em Engenharia Química). Natal. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009. 178p.

STUPA, M. V.; PLATONOV, E. K.; MILKHAILOV, V. T. Mathematical model of drying of granulated anid. **Fibre Chemistry**, v.35, n°.3, p. 233-236, 2003.

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

THUWAPANICHAYANAN, R.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S. Effects of foaming agents and foam density on drying characteristics and textural property of banana foams. **LWT-Food Science and Technology**, v.47, p. 348 - 357, 2012.

TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J. IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 19-31, 2001.

TONON, R.V; BRABET, C.; HUBINGER, M.D. Influência da temperatura do ar de secagem e da concentração de agente carreador sobre as propriedades físico-químicas do suco de açaí em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n.2, p. 444-450, 2009.

TORRES, M. P.; RACHAGANI, S.; PUROHIT, V.; PANDEY, P.; JOSHI, S.; MOORE, E. D.; JOHANSSON, S. L.; SINGH, P. K.; GANTI, A. K.; BATRA S. K. Graviola: A novel promising natural-derived drug that inhibits tumorigenicity and metastasis of pancreatic cancer cells in vitro and in vivo through altering cell metabolism. **Cancer Letters**.v.323, n.1, p.29-40, 2012.

TSAMI, E. Net isosteric heat of sorption in dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 327-335, 1991.

VAN ARSDEL, W. B.; COPLEY, M. J. Food dehydration. Westport, Connecticut: The Avi Publishing Company, 1964. v. 2, 721p.

VERNON-CARTER, E. J.; ESPINOSA-PAREDES, G.; BERISTAIN, C. I.; ROMEROTEHUITZIL, H. R. Effect of foaming agents on the stability, rheological properties, drying kinetics and flavour retention of tamarind foam-mats. **Food Research International**, v. 34, n. 1, p. 587 - 598, 2001.

WAJE, S. S.; MESHAM, M. W.; CHAUDHARY, V., PANDEY, R., MAHANAWAR, P. A.; THORAT, B. N. Drying characteristics of hydrophilic polymer gel: co-polymer of acrylic acid and acrylamide. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 209-216, 2004.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 269-287, 1991.

XIAO, Q.; TONG, Q. Thermodynamic properties of moisture sorption in pullulan-sodium alginate based edible films. **Food Research International**, v. 54, p. 1605-1612, 2013.

9. ANEXO

Resumo da análise de variância das variáveis: teor de água (TA), atividade de água (a_w), acidez total titulável (ATT), potencial hidrogeniônico (pH), sólidos solúveis totais (SST), açúcar solúvel total (AST), açúcar redutor (AR), massa específica aparente (ρ), expansão (EX), estabilidade (ET), coordenadas L^* , a^* , b^* , diferença total de cor (ΔE), croma (C^*), ângulo hue (h^*), índice de escurecimento (BI), em função dos emulsificantes (EM) e da concentração (C).

Tabela A: Resumo da análise de variância das variáveis: teor de água (TA), atividade de água (a_w), acidez total titulável (ATT), potencial hidrogeniônico (pH), sólidos solúveis totais (SST), açúcares solúveis totais (AST), açúcares redutores (AR), em função dos emulsificantes (EM) e da concentração (C).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios						
		TA	a_w	ATT	pH	SST	AST	AR
EM	3	24,13614**	2,95756 10 ^{-5**}	0,0489**	0,1308917**	116,5967**	147,5530**	5,436928**
C	4	25,43321**	6,83617 10 ^{-5**}	0,0168**	0,1926135**	170,0350**	51,25397**	36,80865**
EM x C	12	2,190368**	9,86168 10 ^{-6**}	0,0050**	0,1231008**	16,18833**	45,53183**	6,384255**
Resíduo	80	0,0204672	3,15295 10 ⁻⁶	0,0008	0,001905	0,030000	2,221278	0,1612289
CV (%)		2,518	0,180	5,353	1,175	1,006	8,554	6,154

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela B: Resumo da análise de variância das variáveis: massa específica aparente (ρ), estabilidade (ET), coordenadas L^* , a^* , b^* , croma (C^*) e ângulo hue (h^*), em função dos emulsificantes (EM) e da concentração (C).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios						
		ρ	ET	L^*	a^*	b^*	C^*	h^*
EM	3	2219168**	288,1680**	1835,307**	42,94423**	76,30844**	85,20588**	697,5156**
C	4	481368,5**	3140,903**	259,8735**	8,453709**	9,946262**	8,018602**	132,7256**
EM x C	12	162962,3**	30,62811**	126,6121**	5,804585**	8,818502**	10,10028**	91,17775**
Resíduo	80	96,64272	2,082283	1,034236	0,039654	0,1330175	0,1339775	0,67789555
CV (%)		1,249	13,275	1,358	25,429	2,861	2,848	0,947

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela C: Resumo da análise de variância das variáveis: índice de escurecimento (BI) em função dos emulsificantes (EM) e da concentração (C).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios
		BI
EM	3	802,9691**
C	4	29,76666**
EM x C	12	69,56830**
Resíduo	80	0,5836766
CV (%)		3,906

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela D: Resumo da análise de variância das variáveis: diferença total de cor (ΔE) e expansão (EX), em função dos emulsificantes (EM) e da concentração (C).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios	
		ΔE	EX
EM	3	1423,322**	398533,3**
C	3	44,04240**	43512,22**
EM x C	9	9,030198**	27167,21**
Resíduo	64	1,251418	21,86559
CV (%)		10,887	4,517

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.