

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMILA WICHINHEWSKI ANTUNES

REIDRATAÇÃO DE *BLUEBERRY* DESIDRATADA E COMPORTAMENTO REOLÓGICO
DE SUSPENSÕES

MEDIANEIRA

2017

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMILA WICHINHEWSKI ANTUNES

REIDRATAÇÃO DE *BLUEBERRY* DESIDRATADA E COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE SUSPENSÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Carolina Castilho Garcia
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a Daiane Cristina Lenhard

MEDIANEIRA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Medianeira
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação do Curso de Engenharia de Alimentos

Camila Wichinhewski Antunes

Reidratação de *Blueberry* Desidratada e Comportamento Reológico de Suspensões

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial para obtenção de grau de Engenheiro de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Medianeira, avaliado pela banca formada pelos professores:

Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia
Orientadora

Profa. Dra. Daiane Cristina Lenhard
Co-orientadora

Prof^{ca}. Dr^a. Aziza Kamal Genena
Membro da banca

Prof. Dr. Ilton José Baraldi
Membro da Banca

Camila Wichinhewski Antunes
Aluna

Medianeira, 21 de novembro de 2017.

“A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso”

AGRADECIMENTOS

Grata a Deus e à Nossa Senhora Aparecida que sempre me iluminaram, guiaram e protegeram, sem Eles eu nada seria.

Aos meus pais Osmar e Marlise, meus eternos amores; gratidão, amor, carinho, educação, compreensão, oportunidades; vocês que muitas vezes tiveram que trabalhar dobrado renunciando seus sonhos em favor dos meus, o meu mais profundo agradecimento.

Ao meu irmão, Osmar Jr, que muitas vezes me ajudou nesta caminhada, obrigada por todo amor e carinho.

A minha homenagem *in memoriam* à minha saudosa Avó Dorvalina, que sempre esteve ao meu lado rezando e me guiando para que tudo desse certo, torcendo para o meu sucesso.

Ao meu marido Edson, por toda paciência, compreensão, carinho e amor, e por me ajudar muitas vezes a achar soluções quando elas pareciam não aparecer. Você foi a pessoa que compartilhou comigo os momentos de tristezas e alegrias. Além deste trabalho, dedico todo meu amor a você.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, grata.

Aos meus queridos professores, em especial à minha Orientadora, Prof.^a Dra. Carolina, por todas as orientações, correções, por sempre me ajudar quando precisei. O meu mais sincero muito obrigado.

Por fim, o agradecimento mais especial, a uma pessoa que ainda não sabe ler as linhas em que escrevo, mas espero que um dia, quando for maior ela possa entender, principalmente as faltas cometidas. A ela, Clara Antunes, minha filha dedico este trabalho por completo, pois talvez tenha sido ela que mais sentiu minha falta em sua elaboração, mas também ao longo da faculdade. Querida filha, isso é por nós, mas principalmente para você. Amo você incondicionalmente.

RESUMO

ANTUNES, Camila Wichinhewski. **Reidratação de *blueberry* desidratada e comportamento reológico de suspensões.** 2017. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira.

Blueberry é uma fruta com alto teor de umidade, e que apresenta disponibilidade ao consumidor limitada a certos períodos do ano. Dessa forma, a secagem da fruta apresenta interesse comercial. Estudos de cinética de secagem/reidratação permitem a obtenção de dados necessários ao aperfeiçoamento de operações e construção de equipamentos. O estudo do comportamento reológico gera resultados de interesse para o transporte de fluidos em tubulações. Este trabalho teve como objetivo avaliar a cinética de reidratação de *blueberries* desidratadas e o comportamento reológico de suspensões da fruta seca. As *blueberries* foram reidratadas em água e em leite por 330 minutos às temperaturas de 3, 29 e 45 °C e o ganho de massa foi acompanhado por pesagem sucessivas periódicas. Os dados experimentais da cinética de reidratação nos dois meios foram ajustados à Lei de Fick e a sete modelos empíricos/semiempíricos comumente utilizados para descrever a secagem de alimentos. O comportamento reológico foi estudado através de teste de dureza das frutas antes e após a reidratação (água/29 °C/45 min); e da variação da tensão de cisalhamento *versus* a taxa de deformação de suspensões de sólidos de *blueberries* reidratadas. Os dados experimentais foram ajustados a seis modelos matemáticos comumente utilizados para descrever o comportamento reológico de alimentos. Foi utilizado um planejamento fatorial 2² com três pontos centrais para avaliar a influência da temperatura de análise e concentração de sólidos em suspensão no comportamento reológico das *berries* desidratadas. A Lei de Fick ajustou-se razoavelmente aos dados de reidratação, sendo possível verificar que os coeficientes de difusão do leite para as frutas foram maiores do que os da água, fato relacionado ao transporte de massa. Os coeficientes de difusão foram maiores com o aumento da temperatura de reidratação. Verificou-se melhor ajuste dos dados experimentais durante a reidratação das *berries* em água aos modelos Logarítmico a 3 °C, Verma e Aproximação de difusão a 29 °C e Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão a 45 °C. Para a reidratação em leite, os modelos que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais foram os de Page e Henderson e Pabis a 3 °C e de Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão a 29 °C. Verificou-se que a dureza das *blueberries* reidratadas foi menor do que a das desidratadas e que a dureza das *berries* reidratadas em leite foi significativamente maior do que a das reidratadas em água. Todos os dados experimentais de reometria das suspensões de *blueberries* reidratadas ajustaram-se adequadamente ao modelo de Bingham, cujos parâmetros foram utilizados como respostas do planejamento experimental. Os efeitos das variáveis independentes e de suas interações não foram significativos sobre as respostas tensão limite de escoamento e viscosidade plástica de Bingham, dentro das faixas estudadas de temperatura e concentração. Foram verificadas as tendências de aumento da tensão limite com o aumento das variáveis e redução da viscosidade plástica com o aumento da temperatura.

Palavra-chave: *Vaccinium* sp. Coeficiente de difusão. Dureza. Fluido não newtoniano. Planejamento experimental.

ABSTRACT

ANTUNES, Camila Wichinhewski. **Rehydration of dehydrated blueberry and rheological behavior of suspensions.** 2017. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira.

Blueberry is a fruit with high moisture content, and it has limited availability to the consumer at certain times of the year. So, drying of the fruit is commercially interesting. Studies of drying / rehydration kinetics allow obtaining the necessary data to improve operations and equipment construction. The study of the rheological behavior generates results of interest for the transport of fluids in pipes. This work aimed to evaluate the rehydration kinetics of dehydrated blueberries and the rheological behavior of dried fruit suspensions. The blueberries were rehydrated in water and milk for 330 minutes at temperatures of 3, 29 and 45 °C and the mass gain was accompanied by periodic successive weighing. Experimental data on rehydration kinetics in both media were adjusted to Fick's Law and to the seven empirical / semi-empirical models commonly used to describe food drying. The rheological behavior was studied by testing the hardness of fruits before and after rehydration (water / 29 °C / 45 min); and the shear stress variation versus the deformation rate of rehydrated blueberry solids suspensions. The experimental data were adjusted to six mathematical models commonly used to describe the rheological behavior of foods. A factorial design 2² with three central points was used to evaluate the influence of the temperature of analysis and concentration of suspended solids on the rheological behavior of dehydrated berries. Fick's Law was reasonably adjusted to rehydration data, and it was possible to verify that the milk diffusion coefficients for fruits were higher than those for water, a fact related to mass transport. Diffusion coefficients were higher with increasing rehydration temperature. The best fit of the experimental data during the rehydration of the berries in water to the Logarithmic models at 3 °C, Verma and Diffusion approximation at 29 °C and Verma, Logarithmic and Diffusion approximation at 45 °C was verified. For rehydration in milk, the models that presented the best fit to the experimental data were those of Page and Henderson and Pabis at 3 °C and Verma, Logarithmic and Diffusion approximation at 29 °C. It was found that the hardness of rehydrated blueberries was lower than that of dehydrated ones and that the hardness of rehydrated berries in milk was significantly higher than that of rehydrated in water. All experimental rheometry data of the rehydrated blueberry suspensions were suitably adjusted to the Bingham model, whose parameters were used as experimental planning responses. The effects of the independent variables and their interactions were not significant on Bingham's yield stress and plastic viscosity responses within the studied ranges of temperature and concentration. The tendencies of increase of the limit tension with the increase of the variables and reduction of the plastic viscosity with the increase of the temperature were verified.

Keyword: *Vaccinium* sp. Coefficient of diffusion. Hardness. Non-Newtonian fluid. Experimental design.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Blueberry</i> | 16 |
| Figura 2. <i>Blueberry</i> desidratada. | 20 |
| Figura 3. Curva típica de TPA no Texturômetro General Foods. | 24 |
| Figura 4. Curvas típicas de fluidos com comportamento reológico independente do tempo. | 25 |
| Figura 5. Operação de reidratação em água e em leite. | 27 |
| Figura 6. Medidor de atividade de água. | 30 |
| Figura 7. Texturômetro TA-HD PLUS. | 31 |
| Figura 8. Viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos..... | 32 |
| Figura 9. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo Logarítmico (linha cheia) para a reidratação em água de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 3 °C..... | 40 |
| Figura 10. Valores experimentais do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo Aproximação de difusão (•) e Verma (■) para a reidratação em água de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 29 °C. | 40 |
| Figura 11. Valores experimentais do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Aproximação de difusão e Verma para a reidratação em água de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 45 °C. | 41 |
| Figura 12. Valores experimentais do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Verma e Aproximação de difusão para a reidratação em leite de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 29 °C..... | 44 |
| Figura 13. Valores experimentais do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Page (•) e Henderson e Pabis (■) para a reidratação em leite de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 3 °C. | 44 |
| Figura 14. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Henderson e Pabis (linha cheia) para a reidratação em leite de <i>blueberries</i> desidratadas na temperatura de 3°C..... | 45 |
| Figura 15. Viscosidade aparente versus taxa de deformação para suspensões de sólidos de <i>blueberries</i> desidratadas na concentração de 10 % a 20 °C (•) e 60 °C (■). | 49 |
| Figura 16. Viscosidade aparente versus taxa de deformação para suspensões de sólidos de <i>blueberries</i> desidratadas na concentração de 30 % a 20°C (•) e 60°C (■)..... | 50 |

Figura 17. Viscosidade aparente versus taxa de deformação para suspensões de sólidos de *blueberries* desidratadas na concentração de 20 % a 40 °C (triplicata, ponto central).50

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1. Características físico-químicas dos frutos de <i>blueberrie</i> próprios para a colheita. ... | 18 |
| TABELA 2. Composição nutricional da <i>blueberrie</i> em 100g da fruta. | 19 |
| TABELA 3. Modelos matemáticos utilizados para prever a reidratação de alimentos..... | 28 |
| TABELA 4. Modelos matemáticos utilizados para prever o comportamento reológico das suspensões de <i>blueberries</i> desidratadas. | 33 |
| TABELA 5. Níveis reais e codificados das variáveis estudadas no planejamento fatorial. | 34 |
| TABELA 6. Coeficientes de difusão da água, em $m^2 \cdot s^{-1}$, durante a reidratação das <i>blueberries</i> e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais..... | 36 |
| TABELA 7. Parâmetros estatísticos para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais de reidratação de <i>blueberries</i> em água. | 37 |
| TABELA 8. Parâmetros do modelo de Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão..... | 39 |
| TABELA 9. Coeficientes de difusão do leite, em $m^2 \cdot s^{-1}$, durante a reidratação das <i>blueberries</i> nas diferentes temperaturas e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais. | 41 |
| TABELA 10. Parâmetros estatísticos utilizados para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais. | 42 |
| TABELA 11. Parâmetros dos modelos de Verma, Aproximação de difusão, Page e Henderson e Pabis para a reidratação em leite das <i>blueberries</i> desidratadas..... | 43 |
| TABELA 12. Características físico-químicas das <i>blueberries</i> desidratadas e reidratadas a 29°C com água e com leite por 45 minutos. | 45 |
| TABELA 13. Dureza das <i>blueberries</i> desidratadas e reidratadas em água e em leite (29 °C/45 min). | 46 |
| TABELA 14. Parâmetros estatísticos utilizados para a verificação do ajuste dos modelos reológicos aos dados experimentais em relação às temperaturas e concentrações. | 47 |
| TABELA 15. Parâmetros reológicos para modelo de Bingham das suspensões de <i>blueberries</i> reidratadas nas faixas de concentração e temperatura avaliadas. | 51 |
| TABELA 16. Matriz do delineamento experimental com as variáveis independentes e dependentes para as suspensões de <i>blueberries</i> | 52 |

| | |
|--|----|
| TABELA 17. Efeitos das variáveis independentes temperatura e concentração de sólidos em suspensão sobre a resposta τ_0 | 53 |
| TABELA 18. Efeitos das variáveis independentes temperatura e concentração de sólidos em suspensões sobre a resposta μ_{pl} | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 OBJETIVOS | 15 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1 <i>BLUEBERRY</i> | 16 |
| 3.1.1 Morfologia..... | 16 |
| 3.1.2 Plantio | 17 |
| 3.1.3 Armazenamento | 18 |
| 3.1.4 Características e composição nutricional | 18 |
| 3.1.5 Aspectos econômicos | 19 |
| 3.2. <i>BLUEBERRY</i> DESIDRATADA | 20 |
| 3.3. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO | 21 |
| 3.4. DUREZA..... | 23 |
| 3.5. COMPORTAMENTO REOLÓGICO | 24 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 27 |
| 4.1. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA | 27 |
| 4.2. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO | 27 |
| 4.3. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS | 30 |
| 4.4 DUREZA..... | 30 |
| 4.5 ANÁLISES REOMÉTRICAS | 31 |
| 4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS | 33 |
| 4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL..... | 34 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 36 |
| 5.1 CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO | 36 |
| 5.1.1. Reidratação em água | 36 |
| 5.1.2. Reidratação em leite | 41 |
| 5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA | 45 |
| 5.3 DUREZA..... | 46 |
| 5.4. REOMETRIA | 47 |
| 5.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO..... | 52 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| 6. CONCLUSÃO..... | 56 |
| REFERÊNCIAS | 58 |

1 INTRODUÇÃO

A *blueberry* ou mirtilo é uma fruta nativa de várias regiões da Europa e dos Estados Unidos, pertencente à família *Ericaceae*. Apresenta em seu interior muitas sementes e tem sabor doce - ácido a ácido. Esta fruta ganhou destaque devido às suas muitas propriedades medicinais, sendo conhecida como fonte de longevidade. No Brasil, o maior mercado consumidor é São Paulo (FACHINELLO, 2008).

Alguns fatores que contribuem para o sabor dos frutos são o teor de sólidos solúveis, a acidez e o pH. Antes do seu amadurecimento, a *blueberry* apresenta um pH inferior a 4,5, o qual aumenta no decorrer do seu amadurecimento, influenciando na conservação dos frutos (RASEIRA, 2006).

A fruta possui um alto valor nutritivo e é conhecida pela sua riqueza em diversas vitaminas como A, B, C, entre outras (SOUSA et al., 2007). Atualmente está entre os alimentos com maior teor de antioxidantes e, por esse motivo, tem sido associada à prevenção de patologias como a hipertensão, diabetes tipo II, doenças cardiovasculares, na diminuição dos danos cerebrais em vítimas de AVC e no declínio cognitivo associado ao envelhecimento (NETO, Catherine 2007; ZAFRA-STONE et al., 2007).

O alto teor de umidade da *blueberry*, limita sua vida de prateleira, sendo necessário, dessa forma, realizar a secagem da fruta. A secagem aumenta seu tempo de conservação, pois reduz a atividade de água, estabilizando/diminuindo a atividade microbiológica, bioquímica e química. A desidratação permite ainda uma redução no custo de transporte e armazenamento, devido à leveza e compactação. O processo de desidratação deve garantir o nível adequado de umidade do produto seco para uma melhor conservação da fruta, garantindo sua qualidade (LEWICKI, 1998).

A reidratação em produtos desidratados é um processo complexo, pois tem como finalidade restaurar as propriedades do produto *in natura*, aumentando seu volume devido à absorção de água (PORTO, 2001). Após a água preencher todos os poros, o produto recupera, consideravelmente, seu teor de umidade original (LEE et al., 2006).

O estudo da cinética otimiza o processo de reidratação, levando em consideração a rapidez da absorção de água e como ela será afetada pelas variações de processamento, mostrando como pode ser previsto o tempo de saturação. Os dados de reidratação fornecem informações sobre o

mecanismo de transporte da água, utilizados para determinação do coeficiente de difusão, considerados como efetivo por que, segundo a Lei de Fick, não são rigorosamente representativos dos diversos mecanismos que prevalecem no transporte de água nos produtos (ROCA, 2008).

Com o propósito de projetar tubulações e equipamentos, para auxiliar no controle da qualidade da indústria, na avaliação da textura, e mudanças físico-química que ocorrem durante processo e armazenamento, é necessário o estudo do comportamento reológico, para o controle da qualidade do produto, na análise sensorial e em testes de tempo de prateleira (ALVARADO; AGUILETA, 2001).

Nos estudos reológicos existe uma relação entre taxa de deformação e tensão de cisalhamento, podendo ser linear ou não linear. Se apresentar uma relação linear, o fluido é dito newtoniano e sua viscosidade é constante, independente da taxa de cisalhamento. Se a relação é não linear o fluido é classificado como não newtoniano (SCHRAMM, 2006).

Visando a obtenção de dados necessários para construção/aperfeiçoamento de equipamentos e dados de transporte de fluidos, o presente trabalho teve por objetivo estudar a reidratação da *blueberry* desidratada e avaliar seu comportamento reológico após reidratação.

2 OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Estudar operação de reidratação das *berries* desidratadas e o comportamento reológico de suspensões de *blueberry* reidratada.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar por meio dos teores de umidade, cinzas e proteínas as *blueberries* desidratadas e após a reidratação;
- Estudar a cinética da reidratação da *blueberry*;
- Modelar a reidratação da fruta desidratada;
- Analisar a textura das frutas desidratadas e após a reidratação;
- Avaliar o comportamento reológico de suspensões do produto após a reidratação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BLUEBERRY

Blueberry, também conhecida como mirtilo, pertence à família *Vaccinium* sp. (Figura 1) e é uma fruta nativa da América do Norte (SANTOS; RASEIRA, 2002). Existe uma grande procura pela fruta nos países do Hemisfério Norte, o que impulsionou países da América do Sul a cultivar, se beneficiando durante a entressafra europeia e norte-americana (FACHINELLO, 2008). Seu consumo em todo mundo cresce em média 20% ao ano (HOFFMAN; ANTUNES, 2004), devido às suas características nutricionais, pois é rica em compostos bioativos (NETO, 2007).



Figura 1. *Blueberry*.
Fonte: Domínio público.

No ano de 1983, foram realizados os primeiros experimentos de plantio de *blueberry* no Brasil, iniciativa da Embrapa Clima Temperado de Pelotas, RS. O empreendimento para cultivo da fruta no país ocorreu no ano de 1990, na cidade de Vacaria, RS (ANTUNES; RASEIRA, 2006; FACHINELLO, 2008).

3.1.1 Morfologia

Segundo Galletta e Ballington (1996), as cultivares de *blueberry* podem ser classificadas em cinco grupos: *Highbush*, *Half high*, *Southern highbush*, *Rabbiteye*, *Lowbush*, cujas características principais são descritas a seguir.

- *Highbush*: caracteriza-se por apresentar arbusto alto e apresentar melhor classificação em relação ao tamanho e sabor dos frutos;
- *Half high*: Os arbustos são de médio porte e, para a produção de frutos, exigem temperaturas não tão frias do que o grupo de *Highbush*;
- *Southern highbush*: Os arbustos são de porte alto, com baixa necessidade de frio para a produção de frutos e apresentam boa resistência às doenças;
- *Rabbiteye*: A planta apresenta tolerância ao calor, variações de pH do solo e ataques de fungos, e maior produção por planta. Os frutos têm menor qualidade sensorial e melhor conservabilidade pós-colheita;
- *Lowbush*: Produzem frutos de tamanho pequeno, sendo destinado um número maior para indústrias de processamento.

No Brasil, os estados que apresentam condições climáticas para cultivo da *blueberry*, são o Rio Grande do Sul e São Paulo e Minas Gerais, em menor escala, pois são regiões de clima mais quente. A cultivar que melhor se adaptou no Brasil foi o *rabbiteye* (HERTER; WREGGE, 2004).

3.1.2 Plantio

Para plantio da *blueberrie*, existem algumas orientações gerais: propagação (assexuada ou sexuada), época do plantio (inverno), espaçamento (1,2 m – 1,5 m entre as plantas e 3 m entre as fileiras), custos de implantação (HOFFMAN; ANTUNES, 2004). Podem ser necessárias colheitas em cinco e seis etapas, dependendo do cultivo (RASEIRA; FRANZON, 2012). Esta etapa deve ser realizada em local protegido do sol e refrigerado, nas horas mais frescas do dia (SOUZA et al., 2007).

Para a colheita, é necessário que os frutos apresentem características químicas e físicas, como as citadas na Tabela 1.

TABELA 1. Características físico-químicas dos frutos de *blueberry* próprios para a colheita.

| Características | Valor médio |
|---|--------------------|
| Peso (g) | 1,0 - 1,3 |
| Sólidos Solúveis Totais (% SST) | 13 – 14 |
| Acidez titulável (AT) (% ácido cítrico) | 0,4 - 0,5 |
| Relação SST/AT | 36 – 37 |
| Firmeza (N) | 40 - 45 |

Fonte: COUTINHO; CANTILLANO (2004).

3.1.3 Armazenamento

Para reduzir rapidamente os processos de respiração e transpiração da fruta, diminui-se a temperatura antes de armazenadas, sofrendo um pré resfriamento por 4 h à temperatura de 4 °C (COUTINHO; CANTILLANO, 2004).

O armazenamento da *blueberry* deve ser em condições ambientes, com temperaturas entre 20 e 25 °C, com intuito de conservar a qualidade da fruta, apresentando uma porcentagem de umidade relativa de 70%, apresentando vida útil de três a cinco semanas (SOUZA et al., 2007).

3.1.4 Características e composição nutricional

A *blueberry* tem um consumo muito alto na Europa e Estados Unidos, graças a seu sabor exótico e suas propriedades medicinais, podendo ser considerada alimento funcional (ROBERFROID, 2002; BEATTIE et al., 2005). Existem estudos que propõem que os *blueberrys* possam ter propriedades antidiabéticas e conferir proteção contra doenças cardiovasculares, além de impedir a fixação e o desenvolvimento da *Escherichia coli*, bactéria causadora de infecções no trato urinário (NETO, 2007; ZAFRA-STONE et al., 2007; SMITH et al., 2000). Rica em vitamina C, sais minerais e outros componentes como taninos, pectinas e antocianinas, vem ganhando destaque devido à sua propriedade antioxidante (SOUSA et al., 2007).

Com coloração roxo-azulada, apresenta muitas sementes em seu interior, e sabor agridoce, de difícil comparação com outros alimentos (FACHINELLO, 2008). No Brasil tem um preço relativamente alto.

Na Tabela 2 está apresentada a composição nutricional da *blueberrie* em 100 g da fruta.

TABELA 2. Composição nutricional da *blueberrie* em 100g da fruta.

| Nutrientes em 100 g de fruto | |
|---------------------------------------|--------------|
| Umidade | 83-87 g |
| Valor Energético | 51-62 Kcal |
| Proteínas | 0,4-0,7 g |
| Lipídios | 0,5 g |
| Glicose | 5-7 g |
| Frutose | 5-7 g |
| Sacarose | nada |
| Fibra | 1-1,5 g |
| Cinzas | 0,19-0,25 g |
| Sais Minerais | |
| Cálcio | 11,4-12,2 mg |
| Ferro | 0,6 mg |
| Magnésio | 5,8-8,4 mg |
| Fosforo | 14-47 mg |
| Potássio | 48-112 mg |
| Sódio | 3,4-4,3 mg |
| Zinco | 0,1 mg |
| Cobre | 0,1 mg |
| Manganês | 0,4-1,2 mg |
| Vitaminas e outros componentes | |
| Vitamina C | 22-62 mg |
| Taninos | 270-550 mg |
| Pectinas | 300-600 mg |
| Antocianinas | 300-725 mg |

Fonte: SOUZA et al., (2007)

3.1.5 Aspectos econômicos

A *blueberry* atinge preços interessantes no mercado Europeu, envolvendo consumidores de diversos níveis econômicos (SANTOS et al., 2007).

Zito (2006), mostra que os Estados Unidos e o Canadá são responsáveis por grande parte da produção mundial. Os Estados Unidos apresentam os maiores índices de consumo, importando

cerca de 82% da produção restante do mundo. O Chile destaca-se como maior produtor da América do Sul (MADAIL; SANTOS, 2007).

As perspectivas de cultivo no Brasil são promissoras, devido ao fato de a colheita no país coincidir com a entressafra dos maiores países produtores e consumidores (SANTOS, 2004). Para o mercado de Miami, o melhor período para exportação da fruta *blueberry* é entre os meses de outubro e novembro, custando em torno de 20 a 25 US\$·Kg⁻¹ (ANTUNES et al., 2008).

No Brasil a fruta comercializada *in natura*, segundo o Instituto de Economia Agrícola, apresenta um preço mínimo de R\$ 15,90 por 125 g, valor alto pelo fato de ser pouco cultivada. A fruta congelada, destinada à indústria, é comercializada pela metade do preço do produto fresco (FACHINELLO, 2008).

3.2. BLUEBERRY DESIDRATADA

A *blueberry* pode ser destinada tanto para o consumo *in natura*, quanto ao processamento, na fabricação de sucos ou desidratadas (KLUGE et al., 1994; RASEIRA; ANTUNES, 2004). A desidratação de um alimento é uma operação unitária de remoção de água com transferência de calor e massa, visando a redução da atividade de água (a_w) e, conseqüentemente, do crescimento microbiano, e de reações químicas e bioquímicas, tais como, a atividade enzimática, facilitando assim o armazenamento e transporte, pois o produto desidratado não necessita de refrigeração (ORDOÑEZ, 2005). Na Figura 2 é apresentado o aspecto visual da fruta desidratada.



Figura 2. *Blueberry* desidratada.
Fonte: Domínio público.

3.3. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO

Para a recuperação das propriedades do produto *in natura*, a fruta desidratada passa por um processo complexo de reidratação, o qual, em última análise, indica os danos provocados aos tecidos do alimento (GABAS et al., 1999). A reidratação é dividida em três processos: embebição da fruta seca, inchamento da fruta reidratada e migração de compostos solúveis, e tem como finalidade obter produtos que, quando reconstituídos apresenta as características de textura e aumento do volume adequados para o consumo (SANJUÁN et al., 1999; PORTO, 2001). Segundo Lee et al. (2006), após a água preencher todos os poros, o produto restaura as propriedades do produto fresco.

O estudo da cinética de reidratação do alimento possibilita o projeto de equipamentos e a otimização do processo de reidratação, porque considera a rapidez da absorção de água e como ela será afetada pelas variações de processamento, apontando como pode ser previsto o tempo de saturação (PARK, 2006).

Na reidratação da fruta por imersão em água líquida há um fluxo transiente de água na direção radial. Nestas condições o fator que controla a transferência de massa é a resistência interna decorrente da difusão da água para dentro da fruta (ROCA et al., 2008). A relação entre o fluxo de massa e o gradiente de concentração é dada pela segunda Lei de Fick, apresentada na Equação 1.

$$\frac{dX}{dt} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (1)$$

Em que: X representa a umidade, em base seca; t , o tempo, em s; z é uma dimensão característica, que depende do formato do sólido, em m; D_{ef} representa o coeficiente de difusão efetivo da água durante a reidratação do sólido, em m^2/s .

Crank (1975) propôs soluções para a Lei de Fick (Eq. 1) para condições iniciais e de contorno e sólidos com geometria definida, infinita ou semi infinita (placas, cilindros, esferas). A solução integrada de Crank (1975) para uma esfera é apresentada nas Equações 2 e 3.

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \left[e^{(-\pi^2.F_0)} + \frac{1}{4} e^{(-4\pi^2.F_0)} + \frac{1}{9} e^{(-9\pi^2.F_0)} + \dots \right] = f(F_0)_{esfera} \quad (2)$$

$$F_0 = \frac{D_{ef} \cdot t}{r^2} \quad (3)$$

Em que: X_t representa a umidade, em base seca, média do sólido no tempo t ; X_{eq} é a umidade, em base seca, de equilíbrio; X_0 representa a umidade inicial, em base seca, do sólido; F_0 é o número de Fourier; D_{ef} representa o coeficiente de difusão do líquido aplicável ao movimento através do sólido; t é o tempo; r é o raio das esfera.

Produtos desidratados são muito utilizados em preparados de sopas e são reidratados previamente ao consumo, como abóbora (BORIN et al., 2008), tomate (TONON et al., 2004), champignon em fatias (MIMURA et al., 2014).

Marques et al. (2009) reidrataram as seguintes frutas liofilizadas: abacaxi, acerola, manga, goiaba e mamão a 25 ° C em água destilada durante 6 h. Os modelos Exponencial, Peleg e Weibull foram ajustadas aos dados experimentais pela análise de regressão não-linear. O modelo de Weibull foi considerada a mais adequada para descrever a cinética de reidratação, pois proporcionou valores de coeficiente de determinação mais altos e valores baixos de erro da estimativa para todos os frutos examinados.

Ciolin (2016), ao estudar a cinética de reidratação de *cranberries* desidratadas em água e em leite, verificou que a Lei de Fick apresentou ajuste satisfatório aos dados experimentais, com valores de R^2 maiores que 0,90, sendo que os coeficientes de difusão foram $8,33 \cdot 10^{-5}$ (10 °C), $9,35 \cdot 10^{-5}$ (29 °C), $1,25 \cdot 10^{-4}$ (45 °C) $m^2 \cdot s^{-1}$ para a água e $1,21 \cdot 10^{-4}$ (10 °C) e $1,50 \cdot 10^{-4}$ (29 °C) $m^2 \cdot s^{-1}$ para o leite, respectivamente.

Falade e Abbo (2007) estudaram a secagem/reidratação de tâmaras e modelaram as operações com base na Lei de Fick, utilizando uma modificação na Equação 2, pois o formato dos sólidos não era perfeitamente esférico. Os autores verificaram ajuste satisfatório do modelo aos dados experimentais, com $R^2 > 0,9$. Durante a reidratação em água os coeficientes de difusão efetivos variaram de $1,8 \cdot 10^{-10}$ a $1,15 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$ (frutos vermelhos macios) de $2,69 \cdot 10^{-10}$ a $9,51 \cdot 10^{-10} m^2 \cdot s^{-1}$ (variedade Tempo 2) e $4,27 \cdot 10^{-10}$ a $1,41 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}$ (variedade Tempo 3) no intervalo entre 15 e 45 °C. Além disso, os autores verificaram que o aumento da temperatura resultou em maiores

coeficientes de difusão durante o processo de reidratação em água devido ao aumento da velocidade de transporte de água.

3.4. DUREZA

A textura está diretamente relacionada a qualidade e aceitação dos produtos pelos consumidores. Segundo Szczesniak (2002), a maioria das percepções relacionadas a textura ocorre quando os alimentos são manipulados, mastigados e movidos entre os receptores da boca.

Um dos atributos mais afetados pela desidratação é a textura do alimento, devido ao encolhimento ocasionado pela remoção de água durante a secagem, que mesmo aumentando a vida útil do produto, torna-o menos atrativo visualmente (AGUILERA, 2005).

Um método muito utilizado como forma de obtenção de parâmetros de textura em alimentos é o TPA - *Texture Profile Analysis* (HARKER et al., 1997). Este apresenta elevada correlação entre medições instrumentais comparadas com aquelas realizadas em função da análise sensorial (MORGADO; ABREU, 2001). O método consiste na compressão da amostra em duas etapas, fornecendo um gráfico de força pelo tempo, conforme a Figura 3. Os atributos de qualidade que podem ser detectados em um teste de TPA são a fraturabilidade, dureza, coesividade, adesividade, elasticidade e mastigabilidade (ROSENTHAL, 2010; SAHIN; SUMNU, 2006), os quais são calculados automaticamente através das relações entre as áreas dos picos do gráfico.

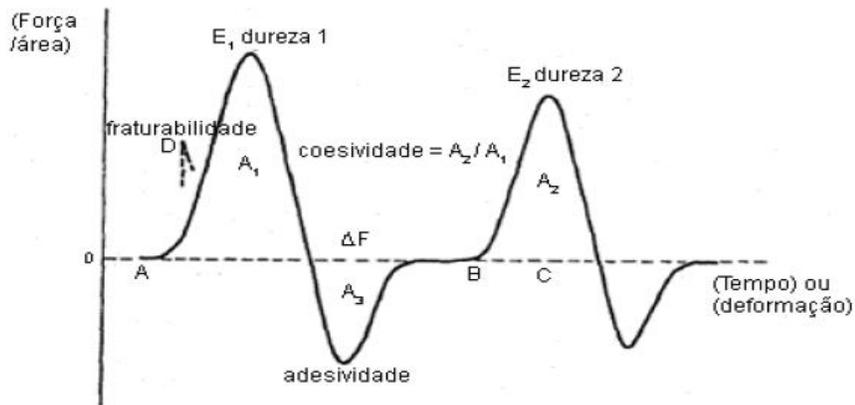


Figura 3. Curva típica de TPA no Texturômetro General Foods.
Fonte: Silva (2013).

Giongo et al. (2013) avaliaram a textura de *blueberries* durante seu desenvolvimento, amadurecimento e armazenamento, verificando que a textura das frutas está diretamente relacionada com o seu frescor, a qualidade e a aceitação deste tipo de produto pelos consumidores.

Gabas et al. (2002) correlacionaram a textura de ameixas secas ao seu conteúdo de umidade, verificando que o aumento da umidade das amostras resultou em menor rigidez.

Ferreira et al. (2008) aplicaram testes de TPA em peras secas em secador solar e verificaram redução significativa da dureza, resultando em células individuais distribuídas em uma matriz macia, explicando sua textura mais macia.

Ciolin (2016), ao estudar a cinética de reidratação de *cranberries* desidratadas em água e em leite verificou-se que a dureza não apresentou alterações perceptíveis, diminuindo 29,2% quando reidratadas em água e 34,3% quando reidratadas em leite.

3.5. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O estudo reológico é de grande utilidade na engenharia para projetos de seleção de bombas, determinação de perda de carga em tubulações, e em operações unitárias como evaporação e esterilização, adequação correta de sistemas de tubulação, trocadores de calor, filtros, bombas, entre outros (ALVARADO; AGUILERA, 2001).

As propriedades reológicas são utilizadas no controle de qualidade, na determinação da funcionalidade de um ingrediente no desenvolvimento de um produto, mudanças físico-químicas que ocorrem durante o processamento e armazenamento de alimentos (ALVARADO; AGUILERA, 2001), testes de vida-de-prateleira e predição de dados sensoriais relacionados à textura de um alimento (HOLDSWORTH, 1993), com o objetivo de estabelecer relações entre as forças aplicadas e as deformações resultantes no alimento (MACOSCO, 1994).

Segundo Lewis (1993), em algumas operações que envolvem aquecimento, resfriamento, homogeneização e concentração, assim como durante fermentações industriais, a viscosidade pode mudar consideravelmente.

Suspensões de sólidos podem apresentar diferentes comportamentos reológicos, sendo estes expressos por diferentes curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento ou pela viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento. O comportamento reológico de um fluido é representado por modelos matemáticos, que permitem representar uma grande quantidade de dados em uma expressão matemática simples (STEFFE; DAUBERT, 2006).

Na Figura 4 são apresentadas as curvas típicas do comportamento reológico de fluidos que não dependem do tempo.

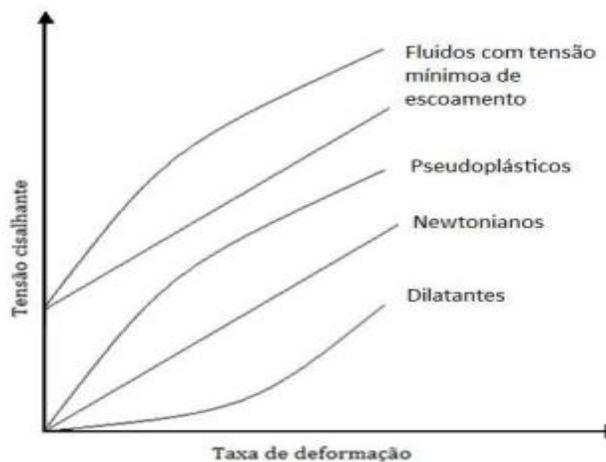


Figura 4. Curvas típicas de fluidos com comportamento reológico independente do tempo.
Fonte: MACHADO, 2012.

Estudos sobre a reologia de suspensões de diferentes tipos de sucos, polpas ou néctares de *berries* tem sido realizados para explicar como os parâmetros concentração de sólidos e temperatura interferem no comportamento reológico. Nindo et al. (2007) avaliaram o

comportamento reológico de suspensões de sólidos de *blueberries* a 10, 15, 20 e 24 °Brix, e verificaram influência da concentração de sólidos e da temperatura na viscosidade dos purês. O comportamento reológico das suspensões foi melhor ajustado pelo modelo de Sisko com $R^2 = 0,99$.

Simunek et al. (2014) estudaram o comportamento reológico de sucos e néctares de maçãs, *cranberries* e *blueberries* submetidos a tratamento ultrassônico e pasteurização. As amostras foram tratadas na frequência de ultrassom de 20 kHz durante 3, 6 e 9 min a 20 °C e amplitude de 60, 90 e 120 μm . O modelo de Ostwald de Waelle resultou nos melhores ajustes aos dados experimentais, sendo que todas as amostras de sucos e néctares de maçãs, *cranberries* e *blueberries* não pasteurizadas e ultrassonificadas apresentaram características de fluidos dilatantes ($n > 1$), não newtonianos.

Ao avaliar o comportamento reológico de suspensões de sólidos de *cranberries* desidratadas nas concentrações de 10, 20 e 30 g de sólidos/100 g de solução nas temperaturas de 20, 40 e 60 °C, Ciolin (2016) verificou que o modelo de Casson apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, com baixos valores de erro médio relativo, erro quadrático médio e com coeficiente de determinação superior a 0,94.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A fruta *blueberry* (*Vaccinium* sp.) desidratada, classificada *Rabbiteye* em relação ao seu cultivo. Foi adquirida em um mercado especialista em produtos naturais, na cidade de Foz do Iguaçu – PR, no mês de setembro de 2016.

4.2. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO

As amostras de *blueberry* foram reidratadas em água e em leite, seguindo a metodologia proposta por Falade e Abbo (2007), em triplicata, em três diferentes temperaturas: a 7 °C (temperatura de geladeira), a 29 °C e a 45 °C. Os experimentos conduzidos às maiores temperaturas necessitaram da utilização de incubadora com controle de temperatura (BOD, Cienlab, Campinas, SP, Brasil). Para a reidratação em leite foram utilizadas as duas menores temperaturas, uma vez que a 45 °C ocorreria crescimento microbiano.

Foi utilizada uma razão fruta: solvente de 1:40 p/p (FALADE; ABBO, 2007), como ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Operação de reidratação em água e em leite.
Fonte: Próprio autor (2017).

O ganho de massa das amostras foi acompanhado por meio de pesagens sucessivas: na primeira hora em intervalos de 15 minutos; nas próximas 3 horas foram utilizados intervalos de 30 minutos para as pesagens; realizou-se pesagem após 7 h e 30 minutos de reidratação e após 24 horas e 31 horas de operação.

Para a pesagem das frutas, as mesmas foram retiradas cuidadosamente do Becker, sendo removida sua umidade superficial gentilmente com papel absorvente antes da pesagem.

Os valores experimentais do ganho de massa das frutas foram ajustados aos modelos matemáticos apresentados na Tabela 3.

TABELA 3. Modelos matemáticos utilizados para prever a reidratação de alimentos.

| | Modelos | |
|----------------------------|---|------|
| Verma | $RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-k_1t}$ | (4) |
| Page | $RX = e^{-kt^n}$ | (5) |
| Newton | $RX = e^{-kt}$ | (6) |
| Logarítmico | $RX = ae^{-kt} + c$ | (7) |
| Henderson e Pabis | $RX = ae^{-kt}$ | (8) |
| Exponencial de Dois Termos | $RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$ | (9) |
| Aproximação da Difusão | $RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$ | (10) |
| Lei de Fick | $RX = \frac{6}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{\psi^2 R_{eq}^2}\right)}$ | (11) |

Em que: RX é a razão de umidade, adimensional, calculada segundo a Equação 12; k, k_1 são constantes de secagem, em t^{-1} ; a, b, c, n são coeficientes dos modelos; t é o tempo de secagem; D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo da água ou do leite durante a reidratação das *blueberries*, em $cm^2 s^{-1}$; R_{eq} é o raio equivalente, em cm; ψ é a esfericidade.

Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2011).

O adimensional de umidade (RX) é calculado segundo a Equação 12.

$$RX = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (12)$$

Em que: X é a umidade do sólido em determinado tempo t , em base seca; X_{eq} é a umidade de equilíbrio, em base seca; X_0 é a umidade inicial do sólido, em base seca.

Para determinar o coeficiente de difusão da água para as frutas, a modelagem da operação de reidratação foi realizada com base na Lei de Fick (Equação 1), como proposto por Falade e

Abbo (2007) com o auxílio do *software* Excel. O cálculo do coeficiente de difusão efetivo da água foi realizado utilizando o primeiro termo da solução integrada de Crank (1975) para uma esfera (Equação 2), segundo a Equação 11, sendo a difusividade determinada a partir do valor do coeficiente angular das curvas de $\ln(X/X_0)$ em função do tempo (t) (VIEIRA et al., 2012).

Para determinar a esfericidade das frutas foram medidos os raios maior e menor do semi eixo de algumas *blueberries*, escolhidas aleatoriamente, calculando um valor médio. Assim, foi possível calcular o raio equivalente (R_{eq}) e a esfericidade (ψ) das frutas, a partir das Equações 13 a 19 (FALADE; ABBO, 2007; HEBBAR; RASTOGI, 2001).

$$R_{eq} = \frac{3V_p}{S_p} = \psi R_{eq} \quad (13)$$

$$V_p = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (14)$$

$$S_p = 2\pi a^2 + \left(\frac{\pi b^2}{e}\right) \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \quad (15)$$

$$e = \left(1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\right)^{1/2} \quad (16)$$

$$S_e = 4\pi R_e^2 \quad (17)$$

$$\psi = \left(\frac{S_e}{S_p}\right) \quad (18)$$

$$R_{eq} = \frac{R_e}{\psi} \quad (19)$$

Em que: R_e é o raio da esfera; V_p é o volume da fruta; S_p representa a área superficial da fruta; ψ é a esfericidade das frutas; R_{eq} é o raio equivalente das *blueberries*, a e b são os raios do maior e do menor semi eixo, respectivamente; S_e é a área superficial da esfera; e é a excentricidade.

Os parâmetros dos modelos de reidratação (Tabela 3) foram determinados através da regressão não-linear dos dados experimentais, com auxílio do *software* STATISTICA 7.0, enquanto que os coeficientes de difusão da água foram ajustados através da linearização da Equação 11, com o auxílio do Excel (Office 2013).

4.3. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Foram realizadas com as *blueberries* desidratadas e reidratadas em água e em leite as seguintes análises: teores de umidade, proteínas, cinzas e sua atividade de água (a_w), em triplicata.

As determinações de umidade, teor de proteínas e teor de cinzas das amostras foram realizadas segundo a metodologia proposta pela ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC, 1995). A atividade de água foi determinada em equipamento medidor de atividade de água (AquaLab 4TE, São José dos Campos, SP, Brasil), apresentado na Figura 4.



Figura 6. Medidor de atividade de água.

Fonte: Próprio autor (2017).

4.4 DUREZA

A avaliação da textura das *blueberries* desidratadas e após a reidratação em água e em leite por 45 minutos a 29 °C foi utilizado um texturômetro TA-HD PLUS da Stable Microsystems (Godalming, Surrey, UK), apresentado na Figura 7. As condições de reidratação foram selecionadas considerando um valor médio para a temperatura ambiente local no verão e no menor tempo necessário para que o ganho de água/leite das amostras fosse maior que 20 %. Dessa maneira, a textura da fruta reidratada, avaliada sensorialmente pelos autores, já apresentava certa semelhança à da fresca.

Foi analisada a dureza das amostras, através de TPA, com velocidade de compressão de 40 mm/min, sendo as amostras comprimidas duas vezes até 50 % de deformação, utilizando doze replicatas.



Figura 7. Texturômetro TA-HD PLUS.
Fonte: Próprio autor (2017).

4.5 ANÁLISES REOMÉTRICAS

Para as análises reométricas foi utilizado um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos da marca Brookfield, modelo LVDV – III ULTRA (Middleboro, MA, USA), apresentado na Figura 8.



Figura 8. Viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos.
Fonte: Próprio autor (2017).

O comportamento reológico de suspensões de *blueberries* desidratadas foi determinado segundo Castillo-Reyes (2008), nas concentrações de 10, 20 e 30 g de sólidos/ 100 mL de água, através das medidas da taxa de deformação e tensão de cisalhamento em três diferentes temperaturas: 20, 40 e 60 °C. As concentrações das suspensões e temperaturas utilizadas foram selecionadas com base no planejamento experimental realizado para averiguar a influência dessas variáveis no comportamento reológico das suspensões de *blueberries* desidratadas.

O preparo das suspensões foi realizado pesando massa determinada de amostras reidratadas em béqueres e adicionando água na proporção desejada. Com o auxílio de um *mixer* para alimentos da marca Black & Decker (Towson, MD, USA), realizou-se a trituração das frutas para obter as suspensões. Esse preparo foi realizado imediatamente antes das medições.

Os dados experimentais foram ajustados a cinco modelos reológicos, sendo esses apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Modelos matemáticos utilizados para prever o comportamento reológico das suspensões de *blueberries* desidratadas.

| | | Modelos |
|------------------|--|----------------|
| Bingham | $\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma}$ | (22) |
| Casson | $\tau^{0,5} = K_{0C}^{0,5} + K_C \dot{\gamma}^{0,5}$ | (23) |
| Herschel-Bulkley | $\tau = \tau_0 + K_H \dot{\gamma}^{n_H}$ | (24) |
| Ostwald de Waele | $\tau = k \dot{\gamma}^n$ | (25) |
| Newton | $\tau = \mu \dot{\gamma}$ | (26) |
| Sisko | $\tau = \eta_{inf} + K_S \dot{\gamma}^{(n_s-1)}$ | (27) |

Em que: τ é a tensão de cisalhamento, em Pa; τ_0 é a tensão de cisalhamento inicial, em Pa; $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, em s^{-1} ; μ é a viscosidade, em Pa·s; μ_{pl} é a viscosidade plástica de Bingham, em Pa·s; η_{inf} é a viscosidade a uma taxa de deformação infinitiva, em Pa·s; k , K_H , K_{0C} , K_S , K_C , n , n_H , n_s são as constantes reológicas (índices de comportamento e consistências índices de comportamento dos fluidos).

Fonte: Adaptado de Nindo et al. (2007).

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O ajuste dos modelos (Tabelas 3 e 4) aos dados experimentais foi avaliado a partir da magnitude do coeficiente de determinação (R^2), do erro quadrático médio ($RMSE$) e dos valores do erro médio relativo (P), estes últimos determinados segundo as Equações 20 e 21, respectivamente.

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{cal} - x_{exp})^2 / n} \quad (20)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \frac{(x_{exp} - x_{calc})}{x_{exp}} \quad (21)$$

Em que: x_{exp} é o valor experimental; x_{cal} é o valor predito pelo modelo; n é o número de observações experimentais.

Os parâmetros estatísticos para avaliação do ajuste dos modelos (Tabelas 3 e 4) aos dados experimentais foram calculados utilizando o Excel (Office 2013).

Segundo Rudy et al. (2015), valores baixos de $RMSE$ e R^2 próximo a 1 indicam bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Erros médios relativos menores que 10 % são indicativos de ajuste razoável para fins práticos, segundo Marinos-Kouris (2003).

Para verificar a existência de diferenças significativas nas características físico-químicas e na dureza das amostras foi realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey a 5 % de significância.

4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Segundo Box et al. (1978), a metodologia do planejamento experimental aliada a teoria estatística fornece informações seguras sobre o processo. Foi empregado um planejamento fatorial 2^2 , com três repetições na condição central. As variáveis independentes empregadas foram: temperatura de medição (x_1) e concentração de sólidos das suspensões de *blueberries* reidratadas (x_2) conforme apresentado na Tabela 5. As variáveis respostas foram escolhidas com base no melhor ajuste dos modelos propostos, Equações 22 a 27, Tabela 4, aos dados experimentais.

Dos modelos apresentados na Tabela 4, o de Bingham foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, sendo assim, as respostas avaliadas no planejamento fatorial foram: a viscosidade plástica de Bingham (μ_{pl}) e a tensão de cisalhamento inicial de Bingham (τ_0).

A Tabela 5 apresenta os níveis reais e codificados das variáveis estudadas no planejamento fatorial completo 2^2 .

TABELA 5. Níveis reais e codificados das variáveis estudadas no planejamento fatorial.

| Variáveis | Código | Níveis | | |
|-------------------------|--------|--------|----|----|
| | | -1 | 0 | 1 |
| Temperatura (°C) | x_1 | 20 | 40 | 60 |
| Concentração (%) | x_2 | 10 | 20 | 30 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Os resultados obtidos foram analisados com auxílio do *software* STATISTICA 7.0 para obtenção de um modelo linear da tensão de cisalhamento inicial e viscosidade das suspensões de sólidos de *blueberries* em função das variáveis temperatura e concentração de sólidos dentro das faixas estudadas.

Para verificar o ajuste desse modelo foi realizada a análise de variância (ANOVA), em um intervalo de confiança de 95 % ($p \leq 0,05$).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO

5.1.1. Reidratação em água

Na Tabela 6 estão apresentados os coeficientes de difusão da água durante a reidratação e os parâmetros estatísticos para avaliar o ajuste da Lei de Fick aos dados experimentais.

TABELA 6. Coeficientes de difusão da água, em $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, durante a reidratação das *blueberries* e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais.

| T | $D_{ef}(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$ | R^2 | P (%) | $RMSE$ |
|-------|--|-------|---------|--------|
| 3 °C | $2,83\cdot 10^{-8}$ | 0,93 | 38,54 | 0,33 |
| 29 °C | $2,83\cdot 10^{-8}$ | 0,85 | 38,83 | 0,32 |
| 45 °C | $4,24\cdot 10^{-8}$ | 0,84 | 41,06 | 0,32 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Foi possível verificar que o coeficiente de difusão da água nas *blueberries* não foi alterado para as temperaturas de 3 °C e 29 °C, fato relacionado ao ajuste do modelo aos dados experimentais, no entanto, relacionando a temperatura de 29 °C e 45 °C foi maior com o aumento da temperatura, o que está relacionado ao aumento das taxas de transferência de massa.

Os dados experimentais apresentaram ajuste razoável à Lei de Fick, uma vez que apresentaram coeficientes de determinação (R^2) menores que 0,95 e que os valores de P foram superiores a 10 %, apesar de os valores de $RMSE$ apresentarem-se próximos de zero.

Falade e Abbo (2007) estudaram a reidratação de três diferentes cultivares de tâmaras em água à diferentes temperaturas e também verificaram aumento do coeficiente de difusão efetivo, com o aumento da temperatura de operação.

Ciolin et al. (2016) verificaram que na reidratação de *cranberrie* desidratada a difusão da água foi influenciada pela temperatura, os coeficientes de difusão da água foram significativamente menores que a difusividade a 45 °C. Com aumento da temperatura de reidratação verificou-se aumento no coeficiente de difusão: $8,33 \cdot 10^{-5}$ (10°C), $9,35 \cdot 10^{-5}$ (29°C), $1,25 \cdot 10^{-4}$ (45°C), apresentando coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,90 e os *RMSE* próximos de zero analisou-se que a Lei de Fick ajustou-se de forma satisfatória aos dados experimentais.

Neste trabalho, além do modelo de Fick, outros modelos matemáticos foram utilizados para prever a reidratação das *blueberries* (Equações 4 a 10, Tabela 3).

Na Tabela 7 estão apresentados os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para averiguar o ajuste dos modelos empíricos/semiempíricos aos dados experimentais da reidratação das *blueberries* em água.

TABELA 7. Parâmetros estatísticos para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais de reidratação de *blueberries* em água.

| Modelo | Temperatura de operação (°C) | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|---------|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|
| | 3 | | | 29 | | | 45 | | |
| | R^2 | P (%) | $RMSE$ | R^2 | P (%) | $RMSE$ | R^2 | P (%) | $RMSE$ |
| Verma | 0,98 | 8,42 | 0,08 | 0,96 | 6,9 | 0,07 | 0,98 | 2,10 | 0,02 |
| Page | 0,96 | 2,80 | 0,02 | 0,90 | 5,37 | 0,05 | 0,93 | 4,86 | 0,04 |
| Newton | 0,94 | 3,45 | 0,03 | 0,87 | 5,80 | 0,05 | 0,85 | 6,40 | 0,05 |
| Logarítmico | 0,99 | 1,13 | 0,01 | 0,95 | 3,28 | 0,03 | 0,98 | 46,04 | 0,36 |
| Henderson e Pabis | 0,94 | 3,41 | 0,03 | 0,88 | 5,90 | 0,05 | 0,87 | 6,06 | 0,05 |
| Exponencial de Dois Termos | 0,97 | 14,32 | 0,13 | 0,91 | 16,85 | 0,15 | 0,92 | 18,27 | 0,16 |
| Aproximação da Difusão | 0,98 | 1,64 | 0,01 | 0,96 | 3,03 | 0,03 | 0,98 | 2,10 | 0,02 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Observou-se que com exceção dos modelos de Newton e Henderson e Pabis, os demais resultaram em valores de coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,90, nas três

temperaturas de operação. Todos os modelos apresentaram valores de *RMSE* próximos de zero, porém os modelos de Verma, Page, Newton e Aproximação de difusão apresentaram os menores valores quando comparados aos demais. Analisando os valores de *P*, verificou-se que para os modelos de Verma, Page, Newton, Henderson e Pabis e Aproximação de difusão os valores de *P* foram inferiores a 10 %, para as três temperaturas de operação, evidenciando o ajuste dos referidos modelos matemáticos aos dados experimentais. O modelo Logarítmico apresentou *P* superior a 10 % apenas a 45 °C e o modelo Exponencial de dois termos apresentou um valor superior a 10 % para as todas as temperaturas analisadas, permitindo inferir o não ajuste aos dados experimentais de reidratação (Tabela 7).

Considerando os dados apresentados na Tabela 7, para a temperatura de 3 °C, o modelo Logarítmico foi o que melhor se adequou aos dados experimentais, apresentando $R^2 = 0,99$ e os menores valores de *P* e *RMSE*. Para a temperatura de 29 °C, o modelo de Aproximação de difusão apresentou o melhor ajuste, com $R^2 = 0,96$ e os menores valores de *P* e *RMSE*. À 45 °C, os modelos de Verma e Aproximação de difusão, foram os que apresentaram os melhores ajustes, com $R^2 = 0,98$ e os menores valores de *P* e *RMSE*.

Ciolin et al. (2016) utilizaram os modelos de Newton, Page, Verma, Exponencial de dois termos, Henderson e Pabis, Aproximação de difusão, e dois termos para representar a cinética de reidratação em água de *cranberries* desidratadas, em diferentes temperaturas: 10, 29 e 45 °C. O autor verificou que, para a temperatura de 10 °C, o modelo de Page foi o que melhor se adequou ($R^2 = 0,98$; $P = 0,71$ %; $RMSE = 0,0082$) aos dados experimentais de reidratação; à temperatura de 29 °C os modelos de Aproximação da difusão ($R^2 = 0,99$; $P = 0,36$ %; $RMSE = 0,0047$) e de Page ($R^2 = 0,99$; $P = 0,38$ %; $RMSE = 0,0045$) foram os que melhor representaram os dados experimentais; e para a temperatura de 45 °C os modelos de Verma ($R^2 = 0,99$; $P = 0,83$ %; $RMSE = 0,0087$) e Aproximação da difusão ($R^2 = 0,99$; $P = 0,83$ %; $RMSE = 0,0087$) apresentaram os melhores ajustes.

Na Tabela 8 estão apresentados os coeficientes dos modelos que apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais da reidratação em água das *blueberries* desidratadas.

TABELA 8. Parâmetros do modelo de Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão.

| Modelo | T (°C) | Parâmetro | | | | |
|------------------------|--------|----------------|----------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|
| | | a | k (s ⁻¹) | k _l (s ⁻¹) | b | c |
| Verma | 3 | 0,9710±0,0075 | 0,0021±0,0008 | -0,0057±0,0075 | - | - |
| | 29 | 0,9980±0,007 | 0,0022±0,0004 | -0,0138±0,0114 | - | - |
| | 45 | 0,0437±0,0678 | 0,0061±0,0038 | 0,0033±0,0007 | - | - |
| Logarítmico | 3 | 0,4075±0,0028 | 0,0062±0,0011 | - | - | 0,6174±0,0317 |
| | 29 | 0,4393±0,0485 | 0,0076±0,0023 | - | - | 0,6011±0,0532 |
| | 45 | 0,4375±0,0259 | 0,0009±0,0016 | - | - | 0,5942±0,0260 |
| Aproximação da difusão | 3 | 0,9706±0,1078 | 0,0021 ±0,0008 | - | 2,7069±4,4687 | - |
| | 29 | 0,99809±0,0076 | 0,0022±0,00036 | - | -6,4006±6,1437 | - |
| | 45 | 0,9563±0,0033 | 0,0033±0,0007 | - | -1,8307±1,563 | - |

Em que: k , k_l são constantes de secagem; a , b e c representam os coeficientes dos modelos.

Fonte: Próprio autor (2017).

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as curvas de reidratação em água das *blueberries* desidratadas, construídas utilizando os modelos que apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais: Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão, para as temperaturas de 3, 29 e 45 °C, sendo possível verificar o ajuste satisfatório dos modelos.

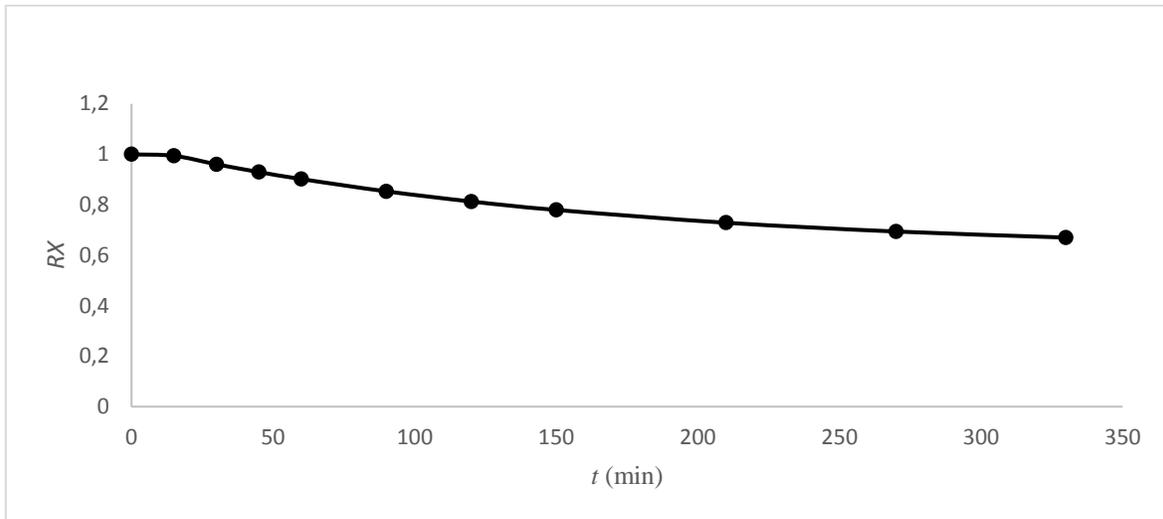


Figura 9. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (R_X) e valores calculados pelo modelo Logarítmico (linha cheia) para a reidratação em água de *blueberries* desidratadas na temperatura de 3 °C.
Fonte: Próprio autor (2017).

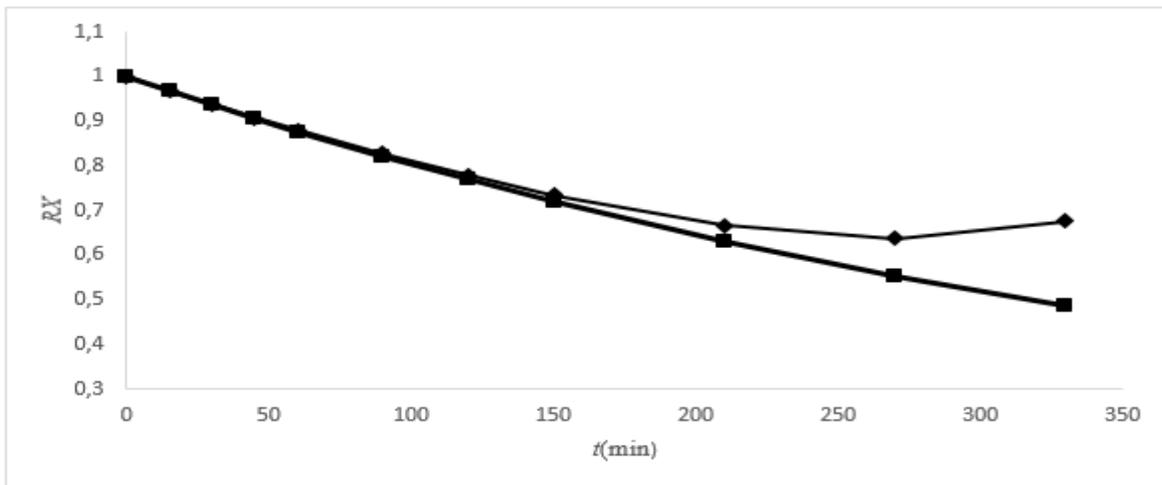


Figura 10. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (R_X) e valores calculados pelo modelo Aproximação de difusão (•) e Verma (■) para a reidratação em água de *blueberries* desidratadas na temperatura de 29 °C.
Fonte: Próprio autor (2017).

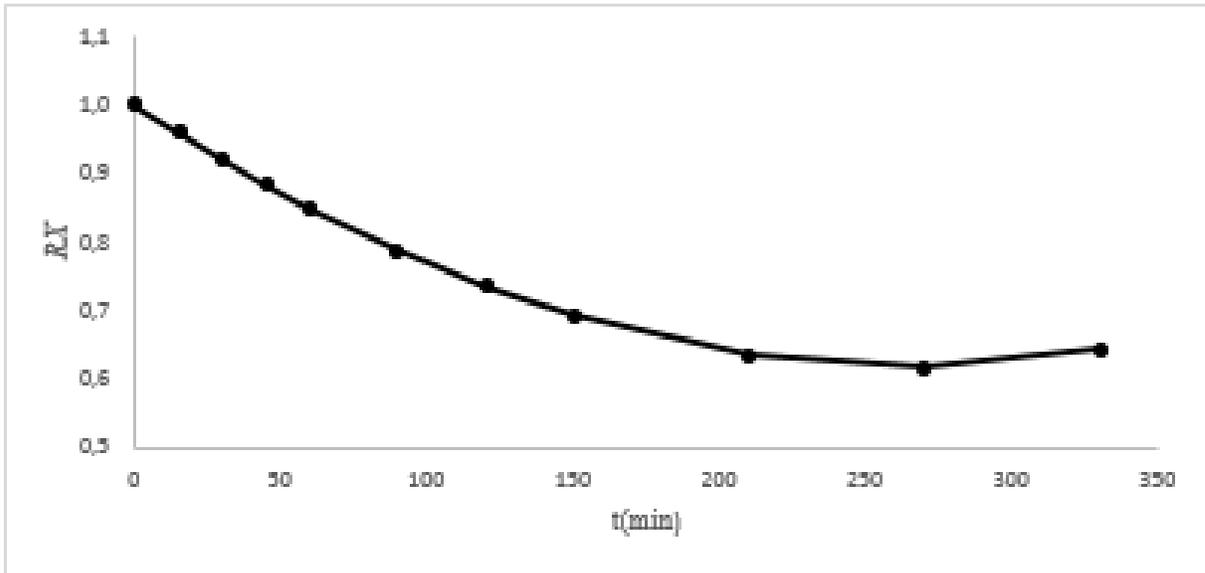


Figura 11. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Aproximação de difusão e Verma para a reidratação em água de *blueberries* desidratadas na temperatura de 45 °C. **Fonte:** Próprio autor (2017).

5.1.2. Reidratação em leite

Os coeficientes de difusão do leite nas frutas desidratadas estão apresentados na Tabela 9, assim como os parâmetros estatísticos utilizados para avaliação do ajuste da Lei de Fick aos dados experimentais.

TABELA 9. Coeficientes de difusão do leite, em $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, durante a reidratação das *blueberries* nas diferentes temperaturas e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais.

| $T(^{\circ}\text{C})$ | $D_{ef}(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$ | R^2 | P (%) | $RMSE$ |
|-----------------------|--|-------|---------|--------|
| 3 | $2,80\cdot 10^{-8}$ | 0,99 | 41,25 | 0,33 |
| 29 | $3,79\cdot 10^{-8}$ | 0,79 | 38,2 | 0,3 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Verificou-se que o coeficiente de difusão do leite nas *blueberries* foi maior com o aumento da temperatura, fato relacionado ao aumento das taxas de transferência de massa; e que o modelo ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais para temperatura de 3 °C (Tabela 9).

Comparando os dados das Tabelas 6 e 9 é possível verificar que para temperatura de 3 °C os coeficientes de difusão da água e do leite foram muito próximos. A 29 °C os coeficientes de difusão do leite foram maiores que os da água durante a reidratação das *blueberries* desidratadas. Esse fato possivelmente está relacionado ao transporte de massa, já que, além da água, outros nutrientes do leite difundem para a fruta, sendo, portanto, possível que os diferentes fluxos de massa afetem os coeficientes de difusão.

Além da Lei de Fick, os modelos apresentados na Tabela 3 foram ajustados aos dados experimentais de reidratação em leite. Na Tabela 10 estão apresentados os valores dos parâmetros estatísticos utilizados para verificar a adequação desses modelos aos dados experimentais de reidratação das *blueberries* em leite, nas diferentes temperaturas de trabalho.

TABELA 10. Parâmetros estatísticos utilizados para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais.

| Modelo | Temperatura de operação (°C) | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|---------|--------|-------|---------|--------|
| | 3 | | | 29 | | |
| | R^2 | P (%) | $RMSE$ | R^2 | P (%) | $RMSE$ |
| Verma | 0,96 | 19,59 | 0,17 | 0,99 | 1,76 | 0,02 |
| Page | 0,88 | 6,40 | 0,04 | 0,99 | 1,90 | 0,02 |
| Newton | 0,77 | 12,21 | 0,27 | 0,97 | 3,05 | 0,03 |
| Logarítmico | 0,94 | 28,60 | 0,23 | 0,99 | 17,45 | 0,15 |
| Henderson e Pabis | 0,83 | 7,65 | 0,05 | 0,99 | 2,06 | 0,02 |
| Exponencial de Dois Termos | 0,86 | 20,74 | 0,16 | 0,99 | 4,09 | 0,03 |
| Aproximação da Difusão | 0,96 | 14,38 | 0,13 | 0,99 | 1,78 | 0,02 |

Fonte: Próprio autor (2017).

É possível verificar que para a temperatura de 3 °C, os modelos de Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão, apesar de apresentarem R^2 superiores a 0,90 e $RMSE$ próximos de zero, apresentaram P maiores que 10 %, mostrando que os modelos representaram de forma razoável os dados experimentais.

Para a temperatura de 29 °C, todos os modelos apresentaram coeficientes de determinação maiores que 0,97, valores de $RMSE$ próximos de zero e valores de P inferiores a 10 %, com exceção

do modelo Logarítmico ($P = 17,45 \%$), evidenciando o bom ajuste dos demais modelos aos dados experimentais.

Os modelos que apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais de reidratação em leite a $3 \text{ }^\circ\text{C}$ foram os de Page e Henderson e Pabis; enquanto que a $29 \text{ }^\circ\text{C}$, foram os modelos de Verma e Aproximação de difusão.

Na Tabela 11 estão apresentados os coeficientes dos modelos que apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais da reidratação em leite das *blueberries* desidratadas a 3 e $29 \text{ }^\circ\text{C}$.

TABELA 11. Parâmetros dos modelos de Verma, Aproximação de difusão, Page e Henderson e Pabis para a reidratação em leite das *blueberries* desidratadas.

| Modelo | $T \text{ (}^\circ\text{C)}$ | Parâmetro | | | |
|------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | | a | $k \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | $k_I \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | B |
| Verma | 3 | $0,0854 \pm 0,1676$ | $0,0047 \pm 0,0048$ | $0,0040 \pm 0,0016$ | - |
| | 29 | $0,0265 \pm 0,0057$ | $0,7223 \pm 340,88$ | $0,0011 \pm 0,0000$ | - |
| Aproximação de difusão | 3 | $0,9146 \pm 0,1676$ | $0,0040 \pm 0,0016$ | - | $-1,1572 \pm 1,6366$ |
| | 29 | $0,0265 \pm 0,0057$ | $0,4591 \pm 21,1413$ | - | $0,0024 \pm 0,1178$ |
| Page | 3 | $0,013036 \pm 0,0077$ | $0,649947 \pm 0,1139$ | - | - |
| Henderson Pabis | 29 | $0,9419 \pm 0,0319$ | $0,0017 \pm 0,0003$ | - | - |

Em que: k , k_I são constantes de secagem; a , b e c representam os coeficientes dos modelos.

Fonte: Próprio autor (2017).

As Figuras 12 a 14 representam as curvas de reidratação em leite das *blueberries* desidratadas nas temperaturas estudadas obtidas com base nos modelos que melhor ajustaram-se aos dados experimentais, sendo possível verificar o ajuste satisfatório dos mesmos.

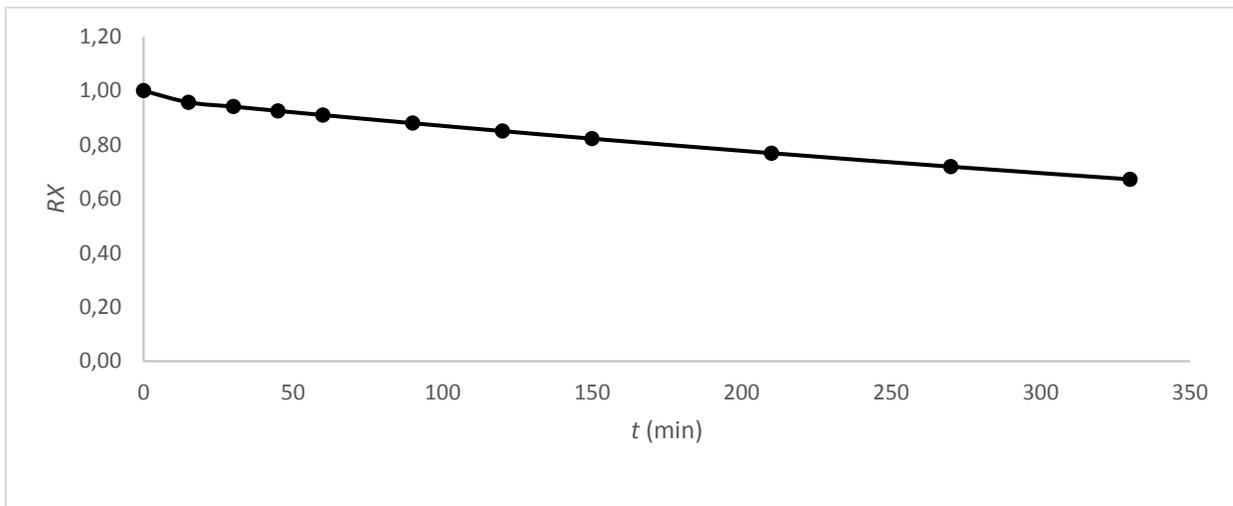


Figura 12. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (R_X) e valores calculados pelo modelo de Verma e Aproximação de difusão (linha cheia) para a reidratação em leite de *blueberries* desidratadas na temperatura de 29 °C.

Fonte: Próprio autor(2017).

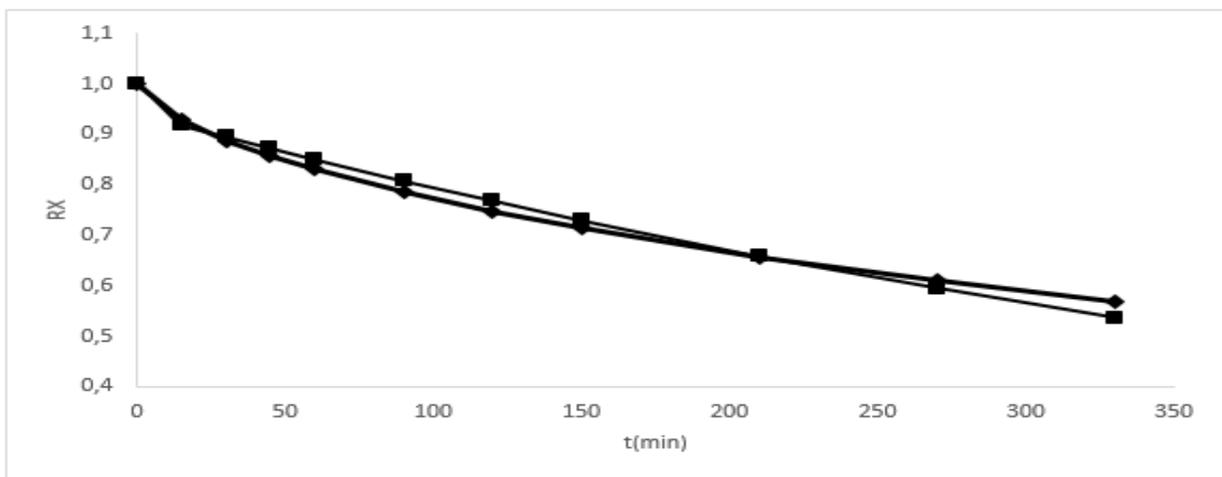


Figura 13. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (R_X) e valores calculados pelo modelo de Page (•) e Henderson e Pabis (■)(linha cheia) para a reidratação em leite de *blueberries* desidratadas na temperatura de 3 °C.

Fonte: Próprio autor (2017).

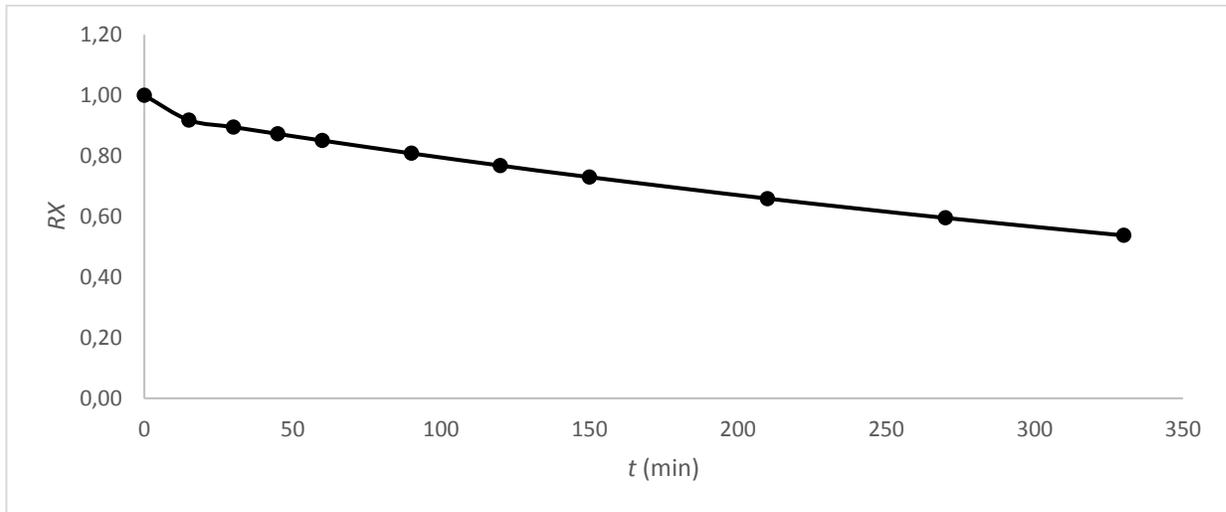


Figura 14. Valores experimentais (pontos) do adimensional de umidade (RX) e valores calculados pelo modelo de Henderson e Pabis (linha cheia) para a reidratação em leite de *blueberries* desidratadas na temperatura de 3°C.

Fonte: Próprio autor (2017).

5.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

As características físico-químicas das *blueberries* desidratadas e das reidratadas a 29 °C em água e em leite por 45 minutos, estão apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12. Características físico-químicas das *blueberries* desidratadas e reidratadas a 29°C com água e com leite por 45 minutos.

| Amostra | Umidade (%) | Cinzas (%) | a_w | Proteínas (%) |
|---------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| Desidratada | 16,78 ± 0,45 ^c | 0,23 ± 0,03 ^b | 0,6072±0,0089 ^b | 1,84±0,32 ^b |
| Reidratada em leite | 35,24 ± 0,95 ^b | 0,59 ± 0,16 ^a | 0,9373±0,0240 ^a | 2,64±0,07 ^a |
| Reidratada em água | 47,33 ± 0,09 ^a | 0,12 ± 0,04 ^b | 0,9678±0,0090 ^a | 1,56±0,15 ^b |

Letras minúsculas sobrescritas na mesma coluna indicam diferença estatística segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Próprio autor (2017).

Na Tabela 12 é possível verificar que as *blueberries* desidratadas apresentaram umidade e atividade de água significativamente menores que as frutas reidratadas, fato esperado e relacionado ao ganho de umidade com o processo de reidratação.

As frutas reidratadas em leite apresentaram teores de cinzas e proteína significativamente maiores que as demais amostras, o que está relacionado à operação de reidratação, pois é fato que durante o processo, além da água, outros compostos presentes no solvente (leite), tais como minerais e aminoácidos, são transferidos para a fruta.

5.3 DUREZA

A dureza das *blueberries* desidratadas e reidratadas em água e em leite a 29 °C por 45 minutos está apresentada na Tabela 13.

TABELA 13. Dureza das *blueberries* desidratadas e reidratadas em água e em leite (29 °C/45 min).

| Amostra | Dureza (N) |
|---------------------|----------------------------|
| Desidratada | 19,03 ± 10,40 ^a |
| Reidratada em água | 2,23 ± 1,82 ^b |
| Reidratada em leite | 3,36 ± 1,82 ^b |

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna apresentam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Próprio autor (2017).

Verificou-se redução significativa da dureza das amostras após a reidratação, resultado esperado devido à transferência do solvente (água ou leite) para as frutas e lixiviação de sólidos das *blueberries* para o meio. As diminuições foram de aproximadamente 88 % em água e 82 % em leite.

A dureza das frutas reidratadas em água foi numericamente menor que a das reidratadas em leite. Segundo Garrido, Lozano e Genovese (2015), esse fato pode estar relacionado à difusão de compostos, como açúcares, presentes no leite para a fruta.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ciolin (2016) em que a dureza das *cranberries* diminui cerca de 29,2% e 34,3% ao reidratar em água e em leite.

5.4. REOMETRIA

Para analisar o comportamento reológico das suspensões, foram utilizados modelos de Bingham, Casson, Herschel-Bulkley, Lei da Potência ou Ostwald de Waelle, Sisko e Newton para avaliar os melhores ajustes dos dados resultantes dentro das faixas de temperatura e concentração estudadas. Os parâmetros estatísticos utilizados para determinar o ajuste dos modelos aos dados experimentais estão apresentados na Tabela 14.

TABELA 14. Parâmetros estatísticos utilizados para a verificação do ajuste dos modelos reológicos aos dados experimentais em relação às temperaturas e concentrações.

| <i>T</i> (°C) | Concentração (%) | Replicata | Modelo | <i>R</i> ² | <i>RMSE</i> | <i>P</i> |
|---------------|------------------|-----------|---------|-----------------------|-------------|----------|
| 20 | 10 | | Bingham | 0,99 | 0,04 | 0,99 |
| | | | Casson | 0,99 | 2,43 | 61,58 |
| | | | HB | 0,99 | 0,02 | 0 |
| | | | LP | 0,99 | 0,03 | 0,72 |
| | | | Sisko | 0,99 | 0,02 | 0,51 |
| | | | Newton | 0,82 | 0,24 | 5,94 |
| 60 | 10 | | Bingham | 0,76 | 0,04 | 4,07 |
| | | | Casson | 0,76 | 1,47 | 48,96 |
| | | | HB | 0,77 | 0,14 | 3,98 |
| | | | LP | 0,74 | 0,14 | 4,28 |
| | | | Sisko | 0,72 | 0,15 | 4,39 |
| | | | Newton | 0 | 0,38 | 11,23 |
| 20 | 30 | | Bingham | 0,92 | 0,73 | 3,67 |
| | | | Casson | 0,92 | 6,98 | 63,35 |
| | | | HB | 0,92 | 5,88 | 10,40 |
| | | | LP | 0,92 | 6,18 | 10,46 |

| | | | | | | | |
|----|---------|------|---------|-------|-------|-------|--|
| 60 | 10 | | Sisko | 0,92 | 5,89 | 10,35 | |
| | | | Newton | 0,75 | 6,21 | 5,01 | |
| | | | Bingham | 0,73 | 0,23 | 2,76 | |
| | | | Casson | 0,73 | 4,71 | 64,28 | |
| | | | HB | 0,74 | 0,25 | 2,68 | |
| | | | LP | 0,71 | 0,24 | 2,83 | |
| | | | Sisko | 0,7 | 0,25 | 2,88 | |
| | | | Newton | 0 | 12,98 | 1,15 | |
| 40 | 20 | 1 | Bingham | 0,99 | 0,03 | 0,85 | |
| | | | Casson | 0,99 | 1,84 | 59,56 | |
| | | | HB | 0,99 | 0,03 | 0,89 | |
| | | | LP | 0,99 | 0,04 | 1,08 | |
| | | | Sisko | 0,99 | 0,15 | 4,39 | |
| | | | Newton | 0,88 | 0,15 | 4,60 | |
| | | | | | | | |
| | | 2 | Bingham | 0,99 | 0,11 | 3,04 | |
| | | | Casson | 0,9 | 1,69 | 52,25 | |
| | | | HB | 0,94 | 0,08 | 2,29 | |
| | | | LP | 0,92 | 0,32 | 2,58 | |
| | | | Sisko | 0,97 | 0,32 | 1,36 | |
| | | | Newton | 0,7 | 10,53 | 0,35 | |
| | | | | | | | |
| 3 | Bingham | 0,97 | 0,06 | 1,69 | | | |
| | Casson | 0,97 | 1,69 | 53,78 | | | |
| | HB | 0,98 | 1,54 | 1,54 | | | |
| | LP | 0,97 | 0,07 | 1,95 | | | |
| | Sisko | 0,97 | 0,07 | 1,89 | | | |
| | Newton | 0,55 | 0,26 | 7,59 | | | |
| | | | | | | | |

HB: Modelo de Herschel Bulckley; LP: Lei da Potência ou modelo de Ostwald de Waelle.

Fonte: Próprio autor (2017).

É possível verificar na Tabela 14 que, dentre os modelos avaliados, o modelo de Newton não se ajustou adequadamente aos dados experimentais para todas as amostras, que apresentaram $R^2 < 0,95$. Logo, o comportamento dos fluidos avaliados foi não newtoniano.

Comportamento não newtoniano também foi verificado por Guazelli et al. (2015), ao avaliar o comportamento reológico da polpa de abacaxi, açaí e coco, sendo que os fluidos foram

descritos como pseudoplásticos, com índices de comportamento variando de $0,489 \pm 0,016$ a $0,554 \pm 0,006$ e índices de consistência de $1,135 \pm 0,10$ a $2,160 \pm 0,37$ Pa·s.

De Sousa et al. (2014) avaliaram o comportamento reológico de polpa de pequi com diferentes teores de sólidos solúveis totais na faixa de temperatura de 25 a 50 °C, verificando que o índice de comportamento do fluido das amostras apresentou valores entre 0,2 e 0,3, confirmando a pseudoplasticidade nas faixas de concentração e temperatura avaliadas. Os autores observaram ainda o aumento da tensão de cisalhamento com o aumento do teor de sólidos solúveis totais.

Segundo os dados da Tabela 14, o modelo de Bingham foi o que apresentou melhor ajuste ou ajuste razoável para todos os fluidos nas faixas de concentração e temperatura avaliadas. Com exceção das suspensões avaliadas à maior temperatura, os coeficientes de determinação (R^2) foram maiores que 0,89, os valores de P menores que 10 % e os de $RMSE$ próximos de zero, indicando bom ajuste do modelo teórico aos dados experimentais. À temperatura de 60 °C, o ajuste desse modelo aos dados experimentais foi razoável, já que os coeficientes de determinação ficaram em torno de 0,75.

Nas Figuras 15 a 17 é possível observar o comportamento da viscosidade aparente *versus* a taxa de deformação das amostras estudadas.

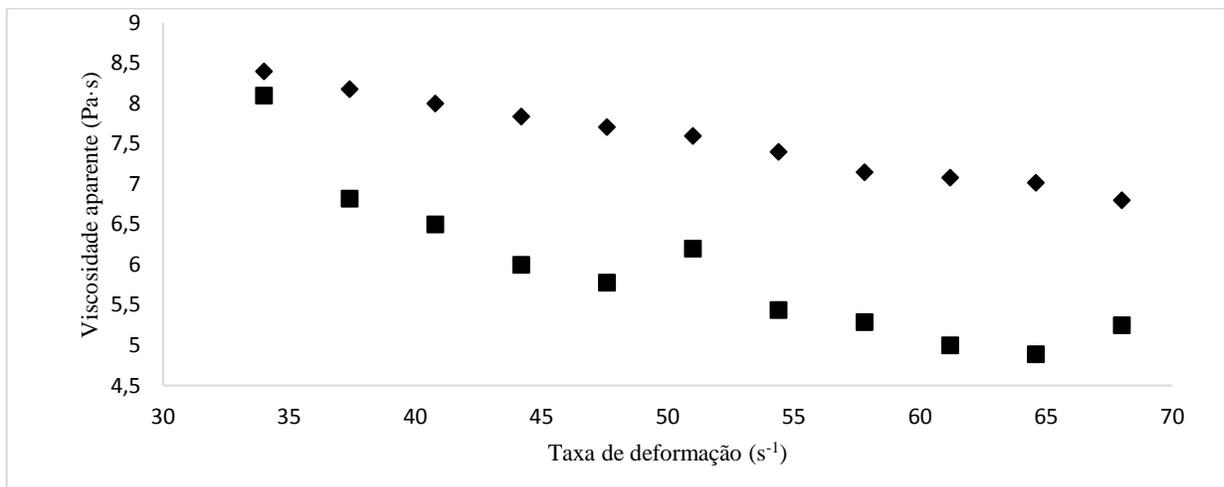


Figura 15. Viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões de sólidos de *blueberries* desidratadas na concentração de 10 % a 20 °C (♦) e 60 °C (■).

Fonte: Próprio autor (2017).

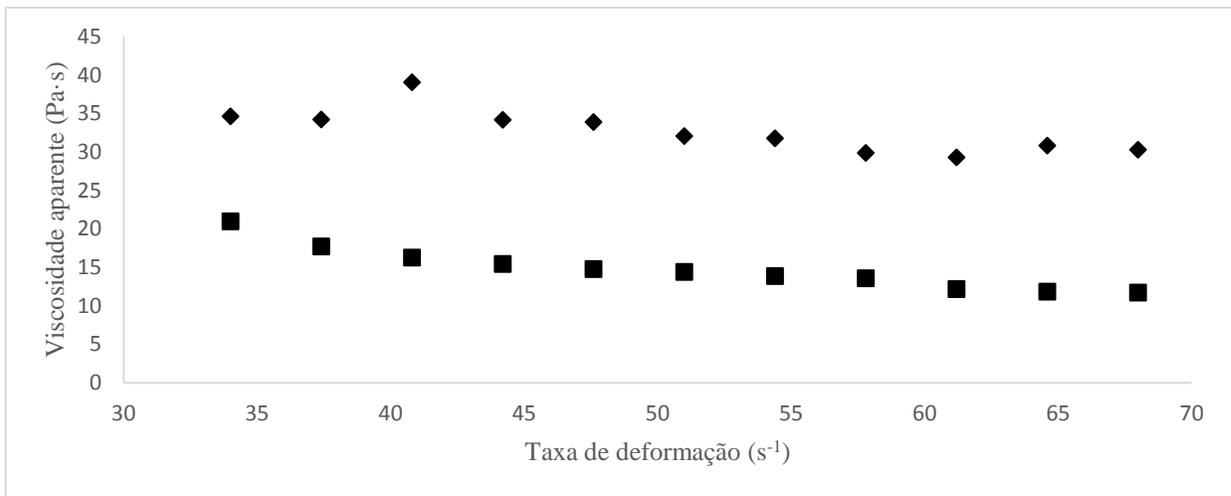


Figura 16. Viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões de sólidos de *blueberries* desidratadas na concentração de 30 % a 20°C (•) e 60°C (■).

Fonte: Próprio autor (2017).

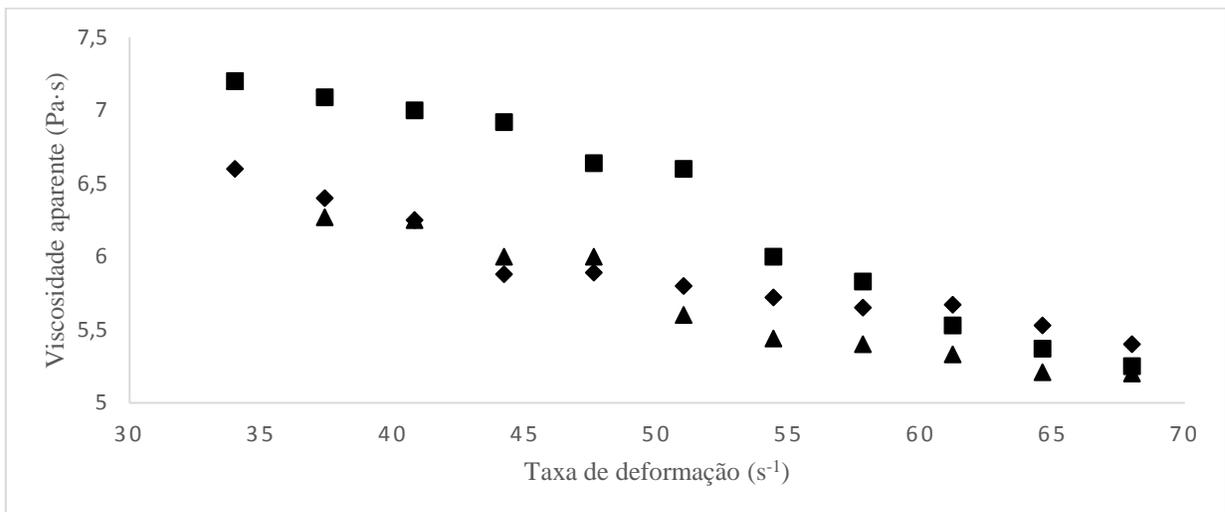


Figura 17. Viscosidade aparente *versus* taxa de deformação para suspensões de sólidos de *blueberries* desidratadas na concentração de 20 % a 40°C (triplicata, ponto central).

Fonte: Próprio autor (2017).

Nas Figuras 15 a 17 observou-se que para todas as concentrações e temperaturas estudadas, a viscosidade diminuiu com o aumento da taxa de deformação. Ainda é possível verificar que tanto a concentração de sólidos quanto a temperatura de medida, influenciaram a viscosidade aparente das amostras (Figuras 15 a 17). O aumento da temperatura de análise resultou em redução da viscosidade aparente das suspensões de sólidos reidratados; enquanto que o aumento do percentual de sólidos em suspensão, resultou em maiores valores de viscosidade aparente. À

temperatura de 60 °C verificaram-se os menores valores de viscosidade aparente, variando de 0,023413, à 10 % de sólidos em suspensão, a 0,035173 Pa·s, para 30 %. A 20 °C os valores da viscosidade aparente variaram de 0,052513 Pa·s, para 10 %, a 0,224776 Pa·s, à concentração de sólidos em suspensão de 30 % (Figuras 15 a 17). À concentração de 20 % de sólidos e temperatura de análise de 40 °C foi observada ligeira variação dos valores da viscosidade aparente das suspensões, fato que pode ser atribuído a mudanças estruturais provenientes da operação de trituração das frutas.

Comportamento semelhante foi verificado por De Sousa et al. (2014) ao estudar o comportamento reológico de polpas de pequi em diferentes concentrações e temperaturas: a viscosidade aparente aumentou com o aumento do teor de sólidos solúveis totais.

Os valores dos parâmetros de viscosidade plástica de Bingham (μ_{pl}) e das tensões limite de escoamento (τ_0) estão indicados na Tabela 15.

TABELA 15. Parâmetros reológicos para modelo de Bingham das suspensões de *blueberries* reidratadas nas faixas de concentração e temperatura avaliadas.

| Temperatura (°C) | Concentração (%) | Parâmetro | |
|------------------|------------------|-------------------|----------------|
| | | μ_{pl} (Pa·s) | τ_0 (mPa) |
| 20 | 10 | 0,0525 | 1,1255 |
| 60 | 10 | 0,0234 | 1,7448 |
| 40 | 20 | 0,0434 | 0,7504 |
| 40 | 20 | 0,0299 | 1,6194 |
| 40 | 20 | 0,0339 | 1,1727 |
| 20 | 30 | 0,2248 | 3,2375 |
| 60 | 30 | 0,0352 | 5,4841 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Segundo os dados apresentados na Tabela 15, verificou-se que o menor valor encontrado para a tensão limite de escoamento foi de 1,1255 mPa na concentração de 10 % à temperatura de medição de 20 °C; o maior valor foi de 5,4841 mPa na concentração de 30 % a 60 °C. Para a viscosidade plástica, de uma forma geral, os menores valores foram observados para a maior temperatura, sendo esse um comportamento comum para polpas e sucos de frutas, pois o aumento da temperatura resulta em diminuição da viscosidade da fase fluida, aumentando a mobilidade das partículas em suspensão e diminuindo sua viscosidade (MONTEIRO, 1999).

Reticena et al. (2015) caracterizaram o comportamento reológico da polpa de maracujá enriquecida com polpa de banana verde, verificando que o modelo de Bingham apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais. A tensão limite de escoamento encontrada pelos autores foi de 3,668 Pa a 20 °C e a viscosidade plástica foi de 0,111 Pa·s.

5.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO COMPORTAMENTO REOLÓGICO

A temperatura é um dos fatores cruciais no estabelecimento de um comportamento reológico. No presente trabalho foram conduzidos experimentos segundo um planejamento fatorial completo 2^2 com três pontos centrais (Tabela 16) para verificar a influência da temperatura e concentração de sólidos no comportamento reológico de suspensões de *blueberries* reidratadas em água. Uma vez que o modelo de Bingham apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, como visto, as respostas avaliadas foram a viscosidade plástica de Bingham e a tensão limite de escoamento.

TABELA 16. Matriz do delineamento experimental com as variáveis independentes e dependentes para as suspensões de *blueberries*.

| Ensaio | x_1^a | x_2^b | μ_{pl} (Pa·s) | τ_0 (mPa) |
|--------|---------|---------|-------------------|----------------|
| 1 | -1(20) | -1(10) | 0,0525 | 1,1255 |
| 2 | 1(60) | -1(10) | 0,0234 | 1,7448 |
| 3 | -1(20) | 1(30) | 0,2248 | 3,2375 |
| 4 | 1(60) | 1(30) | 0,0352 | 5,4841 |
| 5 | 0(40) | 0(20) | 0,0435 | 0,7504 |
| 6 | 0(40) | 0(20) | 0,0299 | 1,6194 |
| 7 | 0(40) | 0(20) | 0,0299 | 1,6194 |

^aTemperatura (°C); ^bConcentração da suspensões de sólidos (%).

Fonte: Próprio autor (2017).

Com os dados da Tabela 16 foi possível calcular os efeitos das duas variáveis estudadas sobre a tensão limite de escoamento (τ_0), cujos resultados são apresentados na Tabela 17.

TABELA 17. Efeitos das variáveis independentes temperatura e concentração de sólidos em suspensão sobre a resposta τ_0 .

| | Efeitos | Erro Padrão | t (3) | p – valor | Coef. |
|-------------------------|----------------|--------------------|--------------|------------------|--------------|
| Média | 2,22587 | 0,474067 | 4,6953 | 0,018271 | 2,2258 |
| Temperatura (°C) | 1,43295 | 1,254263 | 1,1425 | 0,336181 | 0,7165 |
| Concentração (%) | 2,92565 | 1,254263 | 2,3326 | 0,101909 | 1,4628 |
| <i>T x</i> Concentração | 0,81365 | 1,254263 | 0,6487 | 0,562758 | 0,4068 |

Fonte: Próprio autor (2017).

Na Tabela 17 é possível verificar que para todas as variáveis o valor de p foi maior que 0,05, o que indica que nenhuma das variáveis (temperatura e concentração) influenciou significativamente a resposta avaliada (τ_0) dentro das faixas estudadas. Dessa forma, não foi possível determinar um modelo para descrever os efeitos das variáveis independentes do planejamento proposto sobre a resposta tensão limite de escoamento.

Por outro lado, foi possível observar a tendência de o aumento da temperatura resultar em aumento da resposta, uma vez que para essa variável o efeito foi positivo (Tabela 17), corroborando com os resultados da Tabela 16, nos quais, para uma mesma concentração de sólidos em suspensão, o aumento da temperatura de análise resultou em aumento da tensão limite de escoamento.

Da mesma maneira, verificou-se uma tendência de aumento da tensão limite de escoamento ao aumentar a concentração de sólidos em suspensão, já que o efeito foi positivo para essa variável (Tabela 17). Considerando os resultados da Tabela 16, para uma mesma concentração de sólidos em suspensão, o aumento da temperatura ocasionou aumento da tensão limite de escoamento. É válido observar que o valor numérico do efeito positivo da concentração de sólidos foi maior que o da temperatura de medição sobre τ_0 (Tabela 17). Logo, o maior aumento da resposta foi verificado ao aumentar a variável independente concentração de sólidos (Tabela 16).

A interação entre as variáveis temperatura e concentração de sólidos também apresentou efeito positivo, indicando redução da resposta com o decréscimo do valor da interação, porém, assim como para as variáveis independentes, esse efeito não foi significativo (Tabela 17).

Nindo et al. (2007) estudaram o efeito das variáveis temperatura e concentração de sólidos sobre tensão de cisalhamento inicial de purês *blueberries*. Os autores verificaram um efeito positivo da concentração de suspensão de sólidos sobre a resposta tensão de cisalhamento inicial. Os purês a 25 °Brix apresentaram valores de tensão de cisalhamento de 18 a 20 vezes maior do que os purês a 10 °Brix; ao variar a temperatura de 25 até 60 °C, a tensão de cisalhamento diminui cerca de 50 %.

Com os resultados da Tabela 16 foi possível calcular os efeitos das duas variáveis independentes estudadas sobre viscosidade plástica de Bingham (μ_{pl}), cujos resultados são apresentados na Tabela 18.

TABELA 18. Efeitos das variáveis independentes temperatura e concentração de sólidos em suspensões sobre a resposta μ_{pl} .

| | Efeitos | Erro Padrão | t (3) | p – valor | Coef. |
|-------------------------|----------------|--------------------|--------------|------------------|--------------|
| Média | 0,06274 | 0,014361 | 4,3691 | 0,022177 | 0,06274 |
| Temperatura (°C) | -0,1094 | 0,037995 | -2,878 | 0,063631 | -0,0546 |
| Concentração (%) | 0,09205 | 0,037995 | 2,4227 | 0,093941 | 0,04603 |
| <i>T x</i> Concentração | -0,0803 | 0,037995 | -2,112 | 0,125113 | -0,0402 |

* $p \leq 0,05$ indica diferença significativa ao nível de 5 % de significância.

Fonte: Próprio autor (2017).

Assim como verificado para a resposta tensão limite de escoamento, nenhuma das variáveis independentes nem sua interação apresentou efeito significativo sobre a viscosidade plástica, dentro das faixas estudadas de temperatura e concentração. Dessa maneira, não foi possível obter um modelo para descrever os efeitos das variáveis do planejamento proposto sobre a resposta μ_{pl} (Tabela 18).

Logo, foi possível avaliar somente a tendência de que o aumento da temperatura de medição e da interação entre as variáveis independentes do planejamento, resultou na redução da viscosidade plástica de Bingham, já que esses efeitos sobre a referida resposta foram negativos (Tabela 18). De fato, considerando os resultados da Tabela 16, o aumento da temperatura de análise, resultou em redução de μ_{pl} .

Por outro lado, como a variável de concentração de sólidos em suspensão apresentou efeito não significativo e positivo sobre a resposta (Tabela 18), foi possível avaliar que aumentando

a concentração de sólidos em suspensão, tendeu-se a maiores valores da viscosidade plástica (Tabela 16).

Do ponto de vista industrial, a diminuição da viscosidade aparente de um fluido transportado em certa tubulação, facilita o escoamento da suspensão e a troca de calor durante o processamento. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor será a perda de carga durante o escoamento (BEZERRA et al., 2013).

6. CONCLUSÃO

Os dados experimentais de reidratação das *blueberries* em água e em leite apresentaram ajuste satisfatório à Lei de Fick, sendo os coeficientes de difusão efetivo de $2,83 \cdot 10^{-8}$ (3 °C), $2,83 \cdot 10^{-8}$ (29 °C) e $4,24 \cdot 10^{-8}$ (45 °C) m^2/s durante a reidratação em água e de $2,80 \cdot 10^{-8}$ (3 °C) e $3,79 \cdot 10^{-8}$ (29 °C) m^2/s durante a reidratação em leite. Os valores de coeficientes de difusão do leite foram maiores que os da água a 29 °C, fato possivelmente relacionado aos diferentes fluxos de difusão quando a reidratação é realizada em leite.

Diferentes modelos empíricos ajustaram-se aos dados experimentais de reidratação, dependendo da temperatura e meio utilizados na operação de reidratação. Verma, Logarítmico e Aproximação de difusão foram os modelos que apresentaram melhores ajustes aos dados experimentais para reidratação em água. Para reidratação em leite os modelos de Verma, Aproximação de difusão, Page e Henderson e Pabis foram os modelos que apresentaram os melhores ajuste aos dados experimentais.

A reidratação das frutas desidratadas reduziu significativamente sua dureza, devido ao ganho de umidade e lixiviação de solutos das frutas para os meios de reidratação utilizados. Devido ao ganho de solutos do leite pelas *blueberries*, a dureza das *berries* reidratadas em leite foi numericamente maior do que a das reidratadas em água.

O modelo de Bingham ajustou-se razoavelmente aos dados experimentais da tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação das suspensões de *blueberries* reidratadas, nas faixas de concentração e temperatura estudadas.

O planejamento experimental não resultou em efeitos significativos das variáveis independentes (temperatura de medição e concentração de sólidos em suspensão) ou de sua interação sobre as respostas (tensão limite de escoamento e viscosidade plástica de Bingham), nas faixas de temperatura e concentração estudadas, não possibilitando a determinação de modelos para descrever a influência das variáveis sobre as respostas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação das faixas das variáveis independentes estudadas, de maneira a ser possível a construção de superfícies de resposta e avaliação do efeito da temperatura de análise e concentração de sólidos em suspensão sobre o comportamento reológico de suspensões de *berries* reidratadas.

Ainda, seria interessante avaliar o potencial antioxidante das *berries* reidratadas, uma vez que seu consumo está associado aos efeitos benéficos de compostos antioxidantes.

REFERÊNCIAS

AGUILERA, J.M. Why food microstructure? **Journal of Food Engineering**. v. 67, n. 1, p. 3-11, 2005.

ALVARADO, J.D.; AGUILERA, J.M. **Métodos para medir propiedades físicas em indústrias de alimentos**. Ed. Acribia S.A. Zaragoza, 410 p., 2001.

AMES, B.N.; SHIGENAGA, M.K.; HAGEN, T.M. Oxidants, antioxidants, and the degenerative diseases of aging. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. v. 90, n. 17, p. 7915-7922, 1993.

ANTUNES, L.E.C.; GONÇALVES, E.D.; RISTOW, N.C.; CARPENEDO S.; TREVISAN, R. Fenologia, produção e qualidade de frutos de mirtilo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 43, n. 8, p. 1011-1015, 2008.

ANTUNES, L.E.C.; RASSEIRA, M. **Aspectos técnicos da cultura da amora-preta**. Pelotas: Embrapa Clima. p. 54, 2004.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (A.O.A.C.). **Official Methods of Analysis**. 16. ed. v. I e II. Washington, 1995.

BEATTIE, J.; CROZIER, A.; DUTHIE, G.G. Potential health benefits of berries. **Current Nutrition & Food Science**. v. 1, p. 71-86, 2005.

BEZERRA, C. V.; SILVA, L. H. M.; COSTA, R. D. S.; MATTIETTO, R. A.; RODRIGUES, A. M. C. Comportamento reológico de suco misto elaborado com frutas tropicais. **Brazilian Journal of Food Technology**. v. 16, n. 2, p. 155-162, jun. 2013.

BORIN, I.; FRASCARELI, E.C.; MAURO, M.A.; KIMURA, M. Efeito do pré-tratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 28, n. 1, p. 39 – 50, 2008.

BOURNE, Malcolm. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. 2 ed. Academic Press, 2002.

CASTILLO R.J.A.; GUADALUPE, L.S.; CANTÚ, L.D. Rheological Characterization of Vegetal Pear (*Sechium edule*). **AIP Conference Proceedings**. v. 1027. n. 1. AIP, 2008.

CIOLIN, I.; LENHARD, D.; GARCIA, C.C. Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 2016, Fortaleza. Anais Eletrônicos. Fortaleza: COBEQ, 2016. **Reidratação e comportamento reológico de cranberries desidratadas**. Disponível em: <https://proceedings.galoa.com.br/cobeq/cobeq-2016lang=pt-br>. Acesso em: 2 ago. 2017.

CIOLIN, I. **Reidratação e comportamento reológico de cranberries desidratadas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso –Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira. p. 96, 2016.

COUTINHO, E.F.; CANTILLANO, R.F.F. Conservação pós-colheita. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, p. 53-60, 2004.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2nd Ed. Clarendon Press, 1975.

DE SOUSA, E.P.; DE MELO, Q.A.J.; DE FIGUEIRÊDO, R.M.F.; LEMOS, D.M. Comportamento reológico e efeito da temperatura da polpa de pequi em diferentes concentrações. **Brazilian Journal of Food Technology**. v. 17, n. 3, p. 226-235, 2014.

DE SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*). *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 4, p. 883-892, 2011.

FACHINELLO, J.C. PASA, M. D. S., SCHMTIZ, J. D., BETEMPS, D. L. Mirtilo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 2, p. 285-576, 2008.

FALADE, K.O.; ABBO, E.S. Air-drying and rehydration characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) fruits. **Journal of Food Engineering**. v. 79, n. 2, p. 724-730, 2007.

FERREIRA, D.; SILVA, J.A.L.; PINTO, G.; SANTOS, C.; DELGADILLO, I.; COIMBRA, M.A. Effect of sundrying on microstructure and texture of S. Bartolomeu pears (*Pyrus communis L.*). **European Food Research and Technology**. v. 226, p. 1545-1552, 2008.

FREITAS, I. C. **Estudo das interações entre biopolímeros e polpas de frutas tropicais em cisalhamento estacionário e oscilatório**. 2002. 259p. Tese (Doutorado em Engenharia de

Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; FERRARI, F.; TELIS-ROMERO, J. Influence of drying conditions on the rheological properties of prunes. **Drying Technology**. v. 20, n. 7, p. 1485-1502, 2002.

GABAS, A.L.; TELIS-ROMERO, J.; MENEGALLI, F. Effect of chemical pretreatment on the physical properties of dehydrated grapes. **Drying Technology**. v. 17, n. 6, p. 1215- 1226, 1999.

GALLETTA, G.J.; BALLINGTON, J.R. Blueberries, cranberries and lingonberries. **Fruit breeding**, v. 2, p. 1-107, 1996.

GARRIDO, J.I.; LOZANO, J.E.; GENOVESE, D.B. Effect of formulation variables on rheology, texture, colour, and acceptability of apple jelly: Modelling and optimization. **LWT-Food Science and Technology**. v. 62, n. 1, p. 325-332, 2015.

GIONGO, L.; PONCETTA, P.; LORETTI, P.; COSTA, F. Texture profiling of blueberries (*Vaccinium* spp.) during fruit development, ripening and storage. **Postharvest Biology and Technology**. v.76, p.34-39, 2013.

GUAZELLI, R.M. **Estudo do comportamento reológico de polpas de frutas**. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. v.17, n.4, p.349-358, 2015.

HARKER, F.R.; STEC, G.H.M; HALLET, C.I; BENNETTI, L.C. Texture of parenchymatous plant tissue: a comparasion between tensile and other instrumental and sensory measurements of tissue strength and juiciness. **Postharverst Biology and Technology**. v. 11, n. 2, p. 63-72, 1997.

HOFFMAN, A.; ANTUNES, L.E.C. Mirtilo: Grande Potencial. **Cultivar hortaliças e frutas**. v. 5, p. 28-30, 2004.

HOLDSWORTH, S.D. Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: a literature review. **Journal: Transactions of Institution of Chemical Engineers part C**. v. 71, p. 139-179, 1993.

KAISU, R.; JAAKOLA, L.; KÄRENLAMPI, S.; HOHTOLA, A. Organ-specific distribution of phenolic compounds in bilberry (*Vaccinium myrtillus*) and 'northblue' blueberry (*Vaccinium corymbosum* x *V. Angustifolium*). **Food Chemistry**. v. 110, n. 1, p. 156-160, 2008.

KLUGE, R.A.; HOFFMANN, A.; BILHALVA, A.B. Comportamento de frutos de mirtilo (*Vaccinium ashei* Reade) cv. Powder Blue em armazenamento refrigerado. **Ciência Rural**. v. 24, p. 281-285, 1994.

LEE, K.T.; FARID, M.; NGUANG, S.K. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. **Journal of Food Engineering**. v. 72, n. 1, p. 16-23, 2006.

LE MOIGNE, M.; MAURY, C.; BERTRAND, D.; JOURJON, F. Sensory and instrumental characterization of Cabernet Franc grapes according to ripening stages and growing location. **Food Quality and Preference**. v. 19, n. 2, p. 220-231, 2008.

LEWICKI, P.P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**. v. 36, n. 1, p. 81-87, 1998.

LEWIS, M. J. **Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza. Acribia. p. 494, 1993.

MACOSCO, C.W. **Reology: principles, measurements and applications**. Minneapolis, VCH publishers, inc., New York, 1994.

MADAIL, J.C.M.; SANTOS, A.M. **Aspectos econômicos do mirtilo**. Embrapa Clima Temperado, 2007. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mirtilo/SistemaProducaoMirtilo/aspectos.htm>>. Acesso em 17 mai. 2017.

MARKOWSKI, M.; ZIELINSKA, M. Air drying characteristics and Moisture diffusivity of carrots. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 49, p. 212-218, 2012.

MARQUES, L.G.; PRADO, M.M.; FREIRE, J.T. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. **LWT-Food Science and Technology**. v. 42, n. 7, p. 1232-1237, 2009.

MIMURA, J.H.; MATOS, J.R.M.; MATHIAS, A.L. Pré-tratamentos na secagem e reidratação de champignon em fatias. **Ciência Rural**. v. 44, n. 4, p. 717-722, 2014.

MORGADO, R.H.; ABREU, J.D.A. **Textura de sólidos y semissólidos**. In Metodos para medir propiedades físicas em Industria de Alimentos. Eds. Alvarado, J.D. Aguilera, J.M. Zaragoza, Ed Acribia. 410 p. 2001.

MONTEIRO, F.S. **Obtenção de suco de amora-preta (*Rubus spp.*) concentrado em antocianinas utilizando processos de separação por membranas**. 2011. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

NETO, Catherine C. Cranberry and blueberry: evidence for protective effects against cancer and vascular diseases. **Molecular Nutrition & Food Research**. v. 51, n. 6, p. 652-664, 2007.

NINDO, C. I.; TANG, J.; POWERS, J. R.; TAKHAR, P. S. Rheological properties of *blueberry* puree for processing applications. **LWT-Food Science and Technology**. v. 40, n. 2, p. 292-299, 2007.

ORDÓÑEZ, J.A. et al. Tecnologia de alimentos. **Porto Alegre: Artmed**, v. 2, p. 219-239, 2005.

PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; OLIVEIRA, R.A. Transferência de massa e secagem em leitos vibrofluidizados – uma revisão. **Engenharia Agrícola**. v. 26, n. 3, p. 840-855, 2006.

PORTO, P. S.S. **Cinética da secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada**. 2001. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande, 2005.

RASEIRA, M.C.B. Descrição da planta, melhoramento genético e cultivares. **Sistemas de produção: cultivo do mirtilo. Pelotas: Embrapa Clima Temperado**, 2006.

RASEIRA, M.D.C.B.; FRANZON, R.C. Melhoramento genético e cultivares de amora-preta e mirtilo. **Informe Agropecuário**. v. 33, n. 268, p. 11-20, 2012.

RETICENA, K. O. **Estudo do comportamento reológico da polpa de maracujá enriquecida com polpa de banana verde**. 2015. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

ROBERFROID, M. Functional food concept and its application to prebiotics. **Digestive and Liver Disease**. v. 34, p.105-110, 2002.

ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modelling versus food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**. v. 106, p. 1428-1437, 2008.

ROSENTHAL, A.J. Texture profile analysis – how important are the parameters? **Journal of Texture Studies**. v. 41, n. 5, p. 672-684, 2010.

SANJUÁN, N.; SIMAL, S.; BON, J.; MULLET, A. Modelling of broccoli stems rehydration process. **Journal of Food Engineering**. v. 42, p. 27-31, 1999.

SANTOS, A.M.D.; RASEIRA, M. do C. B. A cultura do mirtilo. **Embrapa Clima Temperado**. Pelotas, p. 23, 2002.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Artliber Ed. São Paulo, p. 196, 2006.

SILVA, W. **Comportamento mecânico do queijo de coalho tradicional, com carne seca, tomate seco e orégano armazenados sob refrigeração**. 2013. 74f. Dissertação de Mestrado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Itapetinga, 2013.

SIMUNEK, M.; JAMBRAK, R. A.; DOBROVIE, S.; HERCEG, Z.; VUKUSIE, T. Rheological properties of ultrasound treated apple, cranberry and blueberry juice and nectar. **Journal of Food Science and Technology**, V. 51, N. 12, P. 3577-3593, 2014.

STEFFE, J.F. **Rheological methods in food process engineering**. Freeman Press, 1996.

SKREDE, G.; WROLSTAD, R.E.; DURST, R.W. Changes in anthocyanins and polyphenolics during juice processing of highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Journal of Food Science**. v. 65, p. 357-364, 2000.

SMITH, M.A.L.; MARLEY, K.A.; SEIGLER, D.; SINGLETARY, K.W.; MELINE, B. Bioactive properties of wild blueberry fruits. **Journal of Food Science**. v. 65, p. 352-35, 2000.

SOUSA, M.B.; CURADO, T.; VASCONCELLOS, F.N.; TRIGO, M.J. Mirtilo: qualidade pós-colheita. **Edição no âmbito do Projeto PO AGRO DE&D**, v. 556, 2007. Disponível em

<http://www.inia.vpt/fotos/gca/8_mirtilo_qualidade_pos_colheita_1369137340.pdf> Acesso em: 18 mai. 2017.

SUGAI, A.Y. **Processamento descontínuo de purê de manga (*Mangifera indica* Linn.), variedade Haden: estudo da viabilidade do produto para pronto consumo.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2002.

TOLEDO, R.T. **Fundamentals of food process engineering.** Springer Science & Business Media, 2007.

TONON, R.V.; BARONI, A.F.; HUBINGER, M.D. H. Estudo da desidratação osmótica de tomate em soluções ternárias pela metodologia de superfície de resposta. **Food Science and Technology.** v. 26, n. 3, p. 50-60, set. 2006.

ZAFRA-STONE, S.; YASMIN, T.; BAGCHI, M.; CHATTERJEE, A.; VINSON, J.A.; BAGCHI, D. Berry anthocyanins as novel antioxidants in human health and disease prevention. **Molecular Nutrition & Food Research.** v. 51, p. 675-683, 2007.