

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

ÍGOR HENRIQUE DE MELLO RODRIGUES CIOLIN

**REIDRATAÇÃO E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE
CRANBERRIES DESIDRATADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA
2016

ÍGOR HENRIQUE DE MELLO RODRIGUES CIOLIN

**REIDRATAÇÃO E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE
CRANBERRIES DESIDRATADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Daiane Cristina Lenhard Farias

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carolina Castilho Garcia



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

Ígor Henrique de Mello Rodrigues Ciolin

**REIDRATAÇÃO E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE CRANBERRIES
DESIDRATADAS**

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:

Prof^ª. Dr^ª. Daiane Cristina Lenhard
Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Carolina Castilho Garcia
Co-orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Nádia Cristiane Steinmacher
Membro da Banca

Prof^ª. Dr^ª. Elciane Regina Zanatta
Membro da Banca

Ígor Henrique de Mello Rodrigues Ciolin
Aluno

Medianeira, 23 de novembro de 2016.

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação de curso.

Aos meus pais Elisângela e Marcos

Ao meu irmão Gustavo

Aos meus avós, Ítala, Aparecida e Antônio

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de evolução espiritual a mim concedida nesta existência;

A minha família, por todo apoio cedido em qualquer momento, principalmente nas horas mais difíceis. Em especial à minha mãe, que sempre me encorajou diante de qualquer situação, por acreditar em mim e em meus objetivos, te amo.

Ao CAEALI (Centro Acadêmico de Engenharia de Alimentos) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelas vivências proporcionadas ao longo desta caminhada e por todo o suporte para a realização deste trabalho.

As amigas sinceras que em Medianeira eu conquistei e que levarei comigo a vida toda. Em especial, Mariana, Bianca, Ana Paula, Vinícius, Andressa, Luana, Isabela, Luíza, Matheus e Lays, obrigado por todo apoio e parceria ao longo desses anos e por tornarem os meus dias mais felizes durante este tempo.

Aos meus amigos de Araçatuba, que mesmo longe não deixaram de ser presentes, toda a minha gratidão e admiração a vocês, em especial, Jéssica Cordeiro, Claudeir Sattin, Jéssica Borges e Adrielly Rosseto.

Aos meus queridos professores, que despertaram em mim o amor pela Engenharia de Alimentos, por transmitir todo o conhecimento que adquiri e pelas valiosas orientações durante minha vida acadêmica. Em especial, aos professores César Lenzi, Daniel Walker, Elisandra Sehn, Carolina Garcia, Daiane Lenhard, Eliane Colla, Cleonice Sarmiento, Ilton Baraldi, Deyse Drunkler e Marinês Corso.

As minhas queridas orientadoras, Carolina e Daiane, por acreditarem em mim e neste trabalho, por todas as valiosas orientações e correções, por todas as ideias para realização e por todo apoio a mim concedido sempre que precisei. O meu mais sincero muito obrigado.

Por fim, agradeço a todos que passaram por minha vida durante esses longos cinco anos, até mesmo os que foram seguir a vida em outros lugares, mas que levaram um pouco de mim e que deixaram um pouco de si, como já dizia o grande poeta Carlos Drummond de Andrade: GRATIDÃO, essa palavra-tudo.

"Somos todos visitantes deste tempo, deste lugar. Estamos só de passagem. O Nosso objetivo é observar, crescer, amar. E depois vamos para casa." Provérbio Aborígene.

Leve na sua memória para o resto de sua vida, as coisas boas que surgiram no meio das dificuldades. Elas serão uma prova de sua capacidade em vencer as provas e lhe darão confiança na presença divina, que nos auxilia em qualquer situação, em qualquer tempo, diante de qualquer obstáculo (Chico Xavier).

RESUMO

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

Cranberries desidratadas são frutas que passaram por processos de secagem e são conhecidas por possuírem um alto poder antioxidante. Na América do Norte, são tradicionalmente consumidas como aditivos em cereais matinais, iogurtes e massas. Mudanças nas propriedades mecânicas e reológicas ocorrem quando as *cranberries* são expostas a determinadas condições, como a secagem, ou quando imersas em meio líquido. Este trabalho teve como objetivos a caracterização físico-química de *cranberries* desidratadas, a modelagem da cinética de reidratação das *cranberries* em diferentes temperaturas e meios de imersão, a análise do perfil de textura das *cranberries* desidratadas e reidratadas e a determinação do comportamento reológico das suspensões de *cranberries* em diferentes concentrações de sólidos e em diferentes temperaturas. Para tanto, as frutas foram reidratadas em água e em leite por 6 h as temperaturas de 10, 29 e 45 °C, sendo periodicamente pesadas. Doze modelos foram utilizados para representar a cinética da reidratação das frutas, sendo que a segunda lei de Fick representou satisfatoriamente os dados experimentais ($R^2 > 0,92$). Os coeficientes de difusão da água e do leite durante a reidratação das *cranberries* variaram de $8,33 \cdot 10^{-5}$ a $1,50 \cdot 10^{-4}$ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. Para as *cranberries* reidratadas em água à 10 °C o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais ($R^2 = 0,98$), à 29 °C, foi o modelo da Aproximação da Difusão ($R^2 = 0,98$) e à 45 °C, o modelo de Verma ($R^2 = 0,99$). Para as *cranberries* reidratadas em leite à 10 °C o modelo de Verma foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais ($R^2 = 0,99$) e a 29 °C, foi o modelo de Verma ($R^2 = 0,99$). Com relação à textura, a coesividade das frutas reidratadas apresentou redução significativa em relação à coesividade das frutas desidratadas. Para avaliar o comportamento reológico das suspensões de sólidos, utilizou-se cinco modelos (Ostwald de Waelle, Newton, Herschel-Bulkley, Casson e Bingham), sendo que o comportamento reológico das suspensões foi definido como plástico de Casson, uma vez que o modelo apresentou ajuste satisfatório em todas as faixas de temperatura e concentração avaliadas, com ($R^2 > 0,94$), baixos valores de P e $RMSE$ e valores ideais de B_f . Ainda, foram avaliados os efeitos das variáveis independentes temperatura de medição e concentração da suspensão de sólidos (*cranberries* desidratadas) sobre as respostas de tensão de cisalhamento inicial de Casson (K_{0C}) e viscosidade plástica de Casson (K_C). Verificou-se que o aumento da concentração da suspensão acima de 20%, resultou em maior tensão de cisalhamento inicial, sendo tal fato influenciado pela temperatura, cujo aumento resulta em diminuição significativa da referida resposta quando a concentração é de 30%. Para a viscosidade plástica (K_C), a concentração de sólidos foi a variável chave na definição de (K_C) e, conseqüentemente, da viscosidade aparente. Ainda, temperaturas mais elevadas acarretaram diminuição no valor de (K_C), cujo maior valor foi encontrado para concentrações acima de 20% e a baixas temperaturas.

Palavras chave: Lei de Fick. *Vaccinium macrocarpon*. Modelo de Casson.

ABSTRACT

CIOLIN, Ígor. **Rehydration and rheological behavior of dehydrated *cranberries***. 2016. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Medianeira.

Dried *cranberries* are fruits that have been submitted to drying process and are known for their high antioxidant potential. In North America, they are traditionally consumed as additives in breakfast cereals, yogurts and pasta. Changes in mechanical and rheological properties occur when *cranberries* are exposed to conditions such as drying, or when immersed in aqueous medium. This work aimed to study the physicochemical characterization of dried *cranberries*, the kinetics modelling of *cranberries* rehydration at different temperatures and immersion media, the texture profile analysis of dried and rehydrated *cranberries* and determination of rheological behavior of *cranberries* suspension at different solid concentrations and different temperatures. The fruits were rehydrated in water and in milk for 6 h at temperatures of 10, 29 (room temperature) and 45°C, the sample weights were recorded periodically. Twelve models were used to describe the kinetics of the fruit rehydration, as the Fick's second law satisfactorily represented the experimental data ($R^2 > 0,92$). The diffusion coefficients of water and milk during the *cranberries* rehydration ranged from $8,33 \cdot 10^{-5}$ to $1,50 \cdot 10^{-4}$ $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. For the *cranberries* rehydrated in water at 10 °C the Page model was the best fit to the experimental data ($R^2 = 0,98$), at 29 °C, the model of diffusion approximation ($R^2 = 0,98$) and at 45 °C, the Verma model ($R^2 = 0,99$). Considering texture, the cohesiveness of rehydrated fruits showed a significant reduction when compared to the cohesiveness of dried fruits. In order to evaluate the rheological behavior of solid suspensions, it was used five different models (Ostwald de Waele, Newton, Herschel-Bulkley, Casson e Bingham), and the rheological behavior of suspensions was defined as Casson's plastic, since the model showed a satisfactory fit to all temperatures and concentrations analyzed, with ($R^2 > 0,94$), low values of P and $RMSE$ and ideal values of B_f . Also, it was analyzed the effects of independent variables measurement temperature and concentration of suspended solids (dried *cranberries*) on the Casson initial shearing tension results (K_{OC}) and Casson plastic viscosity (K_C). It was found that the increase of suspension concentration above 20%, increased the initial shearing tension, this parameter is affected by the temperature, once an increase of temperature decreases significantly the results when using concentration of 30%. Considering plastic viscosity (K_C), the concentration of solids was the key parameter to determine (K_C) and, consequently, the apparent viscosity. Also, higher temperatures decreased values of (K_C), once its greatest value was obtained at concentrations above 20% and low temperatures.

Keywords: Fick's law. *Vaccinium macrocarpon*. Casson's Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Cranberry in-natura</i>	17
Figura 2 – <i>Cranberry</i> desidratada e adoçada.....	19
Figura 3 – Curva típica de uma análise instrumental de textura (TPA)	27
Figura 4 – Análise instrumental de textura (TPA)	28
Figura 5 – (a) <i>Cranberries</i> reidratadas em leite e (b) reidratadas em água à 29 °C por 45 min	34
Figura 6 – Texturômetro universal, utilizado para a medição instrumental de textura.....	37
Figura 7 – Viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos, utilizado para determinação ...	38
Figura 8 – Valores experimentais (■) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e	47
Figura 9 – Valores experimentais (▲) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e.....	47
Figura 10 – Valores experimentais (●) da razão de teor de água (R_X ,.....	48
Figura 11 – Valores experimentais (▲) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Verma para a reidratação das <i>cranberries</i> desidratadas.....	50
Figura 12 – Valores experimentais (●) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Verma para a reidratação das <i>cranberries</i> desidratadas.....	51
Figura 13 – (a) Tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para a suspensão de sólidos de <i>cranberries</i> a 10% e 20 °C (●) e 60 °C (▲); (b) para a suspensão de sólidos de <i>cranberries</i> a 20% e.....	54
Figura 14 – (a) Viscosidade aparente versus taxa de deformação para a suspensão de sólidos de <i>cranberries</i> a 10% e 20 °C (▲) e 60 °C (●); (b) para a suspensão de sólidos de <i>cranberries</i> a 20% e	55
Figura 15 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a resposta K_{0C} ($\text{Pa}^{0.5}$) em função	61
Figura 16 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a resposta K_C ($\text{Pa}^{0.5}\cdot\text{s}^{0.5}$) em função da concentração de sólidos e temperatura da suspensão de <i>cranberries</i>	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS ADOCICADAS.....	19
TABELA 2 – COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS ADOCICADAS.....	20
TABELA 3 - MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA PREDIZER A SECAGEM/REIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS.....	26
TABELA 4 – MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA PREDIZER O COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE ALIMENTOS	39
TABELA 5 – NÍVEIS REAIS E CODIFICADOS DAS VARIÁVEIS ESTUDADAS NO PLANEJAMENTO FATORIAL.....	41
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DAS <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS E REIDRATADAS EM ÁGUA E EM LEITE A 29 °C POR 45 MIN....	42
TABELA 7 – COEFICIENTE DE DIFUSÃO DA ÁGUA DURANTE A REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM DIFERENTES TEMPERATURAS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DO MODELO AOS DADOS EXPERIMENTAIS	43
TABELA 8 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DOS MODELOS (EQUAÇÕES 6 A 16, TABELA 3) AOS DADOS EXPERIMENTAIS DE REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM ÁGUA.....	44
TABELA 9 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DOS MODELOS (EQUAÇÕES 6 A 16, TABELA 3) AOS DADOS EXPERIMENTAIS DE REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM ÁGUA.....	44
TABELA 10 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DOS MODELOS (EQUAÇÕES 6 A 16, TABELA 3) AOS DADOS EXPERIMENTAIS DE REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM ÁGUA.....	44
TABELA 11 - VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DE PAGE QUE DESCREVEM A REIDRATAÇÃO EM ÁGUA DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS....	46
TABELA 12 - VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DE VERMA QUE DESCREVEM A REIDRATAÇÃO EM ÁGUA DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS....	46

TABELA 13 - VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DA APROXIMAÇÃO DA DIFUSÃO QUE DESCREVEM A REIDRATAÇÃO EM ÁGUA DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS	46
TABELA 14 - COEFICIENTE DE DIFUSÃO DA ÁGUA DURANTE A REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM DIFERENTES TEMPERATURAS E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DO MODELO AOS DADOS EXPERIMENTAIS	48
TABELA 15 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DOS MODELOS (EQUAÇÕES 6 A 16, TABELA 3) AOS DADOS EXPERIMENTAIS DE REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM LEITE	49
TABELA 16 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS PARA AVALIAR O AJUSTE DOS MODELOS (EQUAÇÕES 6 A 16, TABELA 3) AOS DADOS EXPERIMENTAIS DE REIDRATAÇÃO DE <i>CRANBERRIES</i> EM LEITE	49
TABELA 17 – VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DE VERMA QUE DESCREVEM A REIDRATAÇÃO EM LEITE DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS	50
TABELA 18 – VALORES DOS COEFICIENTES DO MODELO DA APROXIMAÇÃO DA DIFUSÃO QUE DESCREVEM A REIDRATAÇÃO EM LEITE DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS	50
TABELA 19 – PARÂMETROS DE TEXTURA DE <i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS E REIDRATADAS EM ÁGUA E LEITE.....	52
TABELA 20 – PARÂMETROS REOLÓGICOS DO MODELO DE CASSON	56
TABELA 21 – MATRIZ DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL COM NÍVEIS REAIS E CODIFICADOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES, RESPOSTAS DE K_{0C} ($PA^{0,5}$), VALORES PREDITOS PELO MODELO E DESVIOS RELATIVOS, PARA AS SUSPENSÕES DE <i>CRANBERRIES</i>	58
TABELA 22 – MATRIZ DO DELINEAMENTO EXPERIMENTAL COM NÍVEIS REAIS E CODIFICADOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES, RESPOSTAS DE K_C ($PA^{0,5} \cdot S^{0,5}$), VALORES PREDITOS PELO MODELO E DESVIOS RELATIVOS, PARA AS SUSPENSÕES DE <i>CRANBERRIES</i>	58
TABELA 23 - EFEITOS DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (<i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS) EM SUSPENSÃO SOBRE A RESPOSTA K_{0C}	59
TABELA 24 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA A RESPOSTA K_{0C} DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	60

TABELA 25 - ANOVA DO MODELO LINEAR PARA PREDIÇÃO DA RESPOSTA K_{0c} DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO.....	60
TABELA 26 - EFEITOS DAS VARIÁVEIS TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS (<i>CRANBERRIES</i> DESIDRATADAS) EM SUSPENSÃO SOBRE A RESPOSTA K_c	62
TABELA 27 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA A RESPOSTA K_c DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	63
TABELA 28 – ANOVA DO MODELO LINEAR PARA PREDIÇÃO DE K_c (PA) DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PROPOSTO	63
TABELA 29 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS A 10% E 20 °C.....	75
TABELA 30 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS A 10% E 60 °C.....	75
TABELA 31 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	75
TABELA 32 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	76
TABELA 33 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	76
TABELA 34 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	76
TABELA 35 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA OS MODELOS DE ESCOAMENTO AJUSTADOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS	77
TABELA 36 – PARÂMETROS REOLÓGICOS DO MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY	77
TABELA 37 – PARÂMETROS REOLÓGICOS DO MODELO DE OSTWALD DE WAELLE.....	77
TABELA 38 – PARÂMETROS REOLÓGICOS DO MODELO DE BINGHAM.....	78
TABELA 39 – PARÂMETROS REOLÓGICOS DO MODELO DE NEWTON.....	78

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. <i>CRANBERRY</i>	17
3.2. REIDRATAÇÃO.....	20
3.3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	22
3.4. TEXTURA.....	26
3.5. REOLOGIA.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1. OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	33
4.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	33
4.3. CINÉTICA E MODELAGEM DA REIDRATAÇÃO.....	34
4.4. ANÁLISES DE TEXTURA.....	37
4.5. ANÁLISES REOLÓGICAS.....	38
4.6. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	42
5.2. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO.....	42
5.3. TEXTURA.....	51
5.4. REOLOGIA DA SUSPENSÃO DE SÓLIDOS DE <i>CRANBERRIES</i>	53
5.5. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE TRABALHO E DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO SOBRE A TENSÃO DE CISALHAMENTO INICIAL DE CASSON (K_{0C}) E SOBRE A VISCOSIDADE PLÁSTICA DE CASSON (K_C).....	57
6. CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A	76

1. INTRODUÇÃO

A *cranberry* (*Vaccinium macrocarpon*) é uma planta nativa da América do Norte, encontrada principalmente em Massachusetts, Wisconsin, Michigan, Canadá, New Jersey, Oregon e Washington (ZUO; WANG; ZHAN, 2002). É um dos principais produtos comercializados no Leste Canadense e no Nordeste dos Estados Unidos da América (EUA). Devido à comprovação de suas propriedades funcionais, tem sido amplamente cultivada em outros países, como a Polônia (BOROWSKA et al., 2009).

O consumo de *cranberries* tem se tornado cada vez mais frequente na dieta humana, sendo utilizada principalmente como aditivo em produtos de panificação, cereais matinais e laticínios (RUDY et al., 2015). De acordo com Zuo, Wang e Zhan (2002), as *cranberries* tem comumente sido comercializadas frescas (5%), como sucos (60%) molhos, secas/desidratadas e várias outras aplicações (35%).

Estudos recentes mostram que várias espécies de *berries* têm efeitos positivos sobre a saúde e dieta humana, o que pode ser relacionado com sua composição rica em compostos fenólicos, ácidos, açúcares entre outros (MIKULIC-PETKOVSEK et al., 2012). Nos últimos anos, pesquisadores em nutrição humana, tem mostrado grande interesse em pequenas frutas, principalmente as vermelhas, pelo fato delas apresentarem alta quantidade de fenóis, incluindo ácido elágico, antocianinas, ácido clorogênico, quercetinas, flavonóides e kaempferol (ZHANG et al., 2013).

Frutos da espécie *Vaccinium* (*cranberry*, *bilberry*, *lowbush blueberry* e *blueberry*) são ricas fontes de antioxidantes, o que explica o potencial anti-carcinogênico destes frutos (WANG; STRETCH, 2001).

Apesar de benéficas à saúde, boa parte das frutas vermelhas, tais como *cranberry*, *blueberry* e framboesa, tradicionalmente são cultivadas em regiões de clima frio, como, pântanos e florestas de coníferas (DOROFJEVA et al., 2011; OSZMIAŃSKI et al., 2015) e apresentam um determinado período de safra da fruta fresca, sendo estes, fatores que limitam seu consumo (INSTITUTE CRANBERRY, 2015).

Alguns métodos de preservação como a secagem, têm sido utilizados visando aumentar a vida de prateleira e a possibilidade de comercialização de *cranberries* (RUDY et al., 2015). A preservação de frutas, vegetais e produtos similares por processos de desidratação tem sido um grande desafio da atualidade. Devido à configuração desse tipo de

produto, a remoção de umidade deve ser conseguida da maneira menos prejudicial para garantir a qualidade do produto. Dessa maneira as características do produto desidratado aproximam-se ao máximo do produto natural após o processo de reidratação (SINGH, 2001).

A preservação dos compostos bioativos presentes na fruta é fator fundamental a ser considerado durante a secagem. Atualmente, com o aumento do consumo e popularidade das *cranberries* desidratadas, existe uma grande demanda por métodos mais eficientes e efetivos de secagem para este produto, mantendo seu potencial bioativo, que é amplamente associado à saúde (RUDY et al., 2015). Com uma maior preocupação em atender às especificações de qualidade e conservação de energia, enfatiza-se a necessidade de um entendimento completo das operações e problemas relacionados à construção de unidades de desidratação e reidratação (KROKIDA; MARINOS-KOURIS, 2003).

A reidratação pode ser considerada como uma medida dos danos causados pelos processos de secagem e tratamentos de desidratação. É um processo complexo que tem por objetivo a restauração das propriedades do produto fresco (LEE; FARID; NGUANG, 2006; LEWICKI, 1998).

Modelos matemáticos são utilizados para descrever os processos de desidratação e reidratação de alimentos, pois são importantes para o projeto e dimensionamento de equipamentos, para a otimização destas operações, na descrição dos mecanismos envolvidos e verificação da influência das variáveis de processo sobre a transferência de umidade (KROKIDA; MARINOS-KOURIS, 2003).

Estudos sobre o comportamento reológico de suspensões de pequenas frutas, como as *berries*, são escassos. Desta maneira, informações de como a concentração de sólidos e a temperatura influenciam na viscosidade aparente destas suspensões são de grande importância para o projeto de tubulações e equipamentos e para operações de evaporação (NINDO et al., 2005).

Os métodos utilizados para o processamento de *berries* na fabricação de geleias e sucos podem afetar sua qualidade, levando à degradação de compostos fenólicos. A aplicação de calor por longos períodos de tempo e a agitação contínua resultante do bombeamento pode causar danos irreversíveis à estrutura dos alimentos e torná-los pouco atraentes para os consumidores, mesmo se preservados seus compostos bioativos (NINDO et al., 2007).

Kechinski et al. (2011) ressalta que as condições de processamento e do tipo de produto a ser processado são fatores que influenciam na qualidade e nos benefícios oferecidos pelos alimentos. No caso das *blueberries* podem ocorrer perdas de antocianinas, devido à sua

instabilidade sob certas condições de processamento, tais como a temperatura de pasteurização.

Visto que as *cranberries* são fontes riquíssimas de compostos benéficos ao organismo, como os antioxidantes, e considerando que o consumo dessa fruta em muitos países é realizado sob a forma desidratada, verifica-se a necessidade de estudos sobre sua reidratação e parâmetros de qualidade, tais como sua textura. Além disso, uma vez que dados de transporte de fluidos são indispensáveis à indústria, parâmetros reológicos de suspensões de *cranberries* também se mostram relevantes.

Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a cinética de reidratação de *cranberries* desidratadas, suas propriedades mecânicas antes e após a reidratação e avaliar o comportamento reológico de suspensões dessa *berry*.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a cinética de reidratação e o comportamento reológico de *cranberries* desidratadas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a cinética de reidratação das frutas desidratadas e comparar as características físico-químicas das frutas reidratadas e desidratadas;
- Determinar o perfil de textura das *cranberries* antes e após sua reidratação;
- Determinar o comportamento reológico de suspensões de *cranberries* reidratadas com diferentes concentrações de sólidos em diferentes temperaturas de processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CRANBERRY

A *cranberry* ou *oxicoco*, Figura 1, é uma planta verde, conhecida por ser uma falsa baga e possuir sabor ácido bastante pronunciado. Estudos apontam que o consumo regular desta fruta resulta em muitos benefícios à saúde, por serem ricas em fibras (pectina), ácidos (acético, ascórbico, cáprico, málico, valeriânico, cítrico), antioxidantes (flavonóides) e minerais (magnésio, ferro, cálcio e selênio) (CRANBERRY, 2013).



Figura 1 – Cranberry in-natura
Fonte: Magalhães [s.a]

De acordo com “*The Cranberry Institute*” (2015), as *cranberries* possuem um baixo crescimento, sendo uma planta perene, lenhosa, com folhas alternadas, pequenas e ovaladas. A planta produz estolões (hastes horizontais) de até 2 m de comprimento. Possui ramos verticais curtos, de 5 a 20 cm de altura, crescem a partir de gemas nos estolões e estes podem ser tanto vegetativos quanto de frutificação. Cada frutificação vertical pode conter até sete flores. A polinização é principalmente realizada por abelhas.

Por se tratar de um produto adaptável ao clima frio temperado do Hemisfério Norte é encontrado principalmente em áreas pantanosas e acídicas, o que dificulta e limita sua produção no Brasil (CRANBERRY, 2013). De acordo com Franco (2010) a produção de

sucos de *cranberry* no Brasil atendia a uma demanda de 2,4 mil litros mensais em 2007 e aumentou para 65 mil litros mensais em 2010. Ainda, salienta que, parte do produto produzido no Brasil é proveniente de parcerias com produtores do Sul do Chile, que destinam certa quantidade de suas safras a produtores brasileiros.

Frutas como maçãs, *cranberries*, uvas e morangos, são fontes riquíssimas de antioxidantes naturais, tais como os compostos fenólicos (VATTEM; GHAEDIAN; SHETTY, 2005). Os antioxidantes atuam na inibição ou no retardamento das reações em cadeia de processos oxidativos. A capacidade antioxidante dos compostos fenólicos desempenha uma função muito importante no organismo, como na absorção e neutralização de radicais livres, quelando o oxigênio triplete e singlete ou decompondo peróxidos (DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ, 2004). Compostos fenólicos fitoquímicos são metabólitos secundários de origem vegetal, que são sintetizados com a função de proteger as plantas de ataques microbiológicos patogênicos e exposições prolongadas à radiação. Devido a sua grande importância, estão presentes em praticamente todas as espécies vegetais e grupos de alimentos (VATTEM; GHAEDIAN; SHETTY, 2005). A absorção de antioxidantes pelo corpo humano é necessária para contrabalançar os efeitos prejudiciais causados pelos radicais livres provenientes do ambiente e dos processos metabólicos celulares (ZHANG et al., 2011). Segundo Yan (2002) o suco da *cranberry* tem auxiliado potencialmente no tratamento de doenças como infecção do trato urinário (ITU), úlceras estomacais, proteção contra oxidação de lipoproteínas e na atividade anticâncer *in vitro*.

Além de auxiliar no tratamento de infecções do trato urinário, pesquisas têm demonstrado os efeitos positivos do consumo desta fruta tanto na prevenção de infecções, quanto na manutenção de determinados sistemas corporais (urinário e cardiovascular), devido à comprovação de suas propriedades anti-inflamatórias e redução na rigidez arterial, que é utilizada como um indicador de risco de doenças cardiovasculares (CRANBERRY, 2013).

Segundo o relatório anual do *Economic Research Service* do *United Department of Agriculture* (USDA, 2015) as *cranberries* processadas (desidratadas e adoçadas) (Figura 2) correspondem a mais de 75% das exportações norte-americanas de *cranberries*, sendo o estado de Massachusetts o maior produtor, com aproximadamente 94 mil toneladas em 2014 e cerca de 96 mil toneladas em 2015.



Figura 2 – Cranberry desidratada e adoçada
Fonte: Hugo (2009)

O Instituto *Cranberry* fornece informações sobre a secagem das *cranberries* após sua colheita: as *cranberries* são classificadas e lavadas; a maioria das frutas são cortadas a fim de realçar seu sabor natural e então são congeladas para quebrar sua estrutura interna e liberar a coloração vermelha desejada. Ao contrário de outros tipos de *berries*, as *cranberries* são pobres em açúcares e altamente ácidas, o que exige a adição de edulcorantes para se tornarem palatáveis. Durante este passo, elas são adoçadas para ajudar a equilibrar sua acidez e, após, são secas para a remoção do excesso de umidade, promovendo um fácil manuseio e embalagem (INSTITUTE CRANBERRY, 2015).

As *cranberries* adoçadas e desidratadas podem ser utilizadas para conferir sabor e aroma a diversos produtos, sendo consumidas puras, em cereais matinais, com outras variedades de frutas secas e castanhas (CRANBERRY, 2013).

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas a composição físico-química e nutricional, respectivamente, para uma porção de 100 g de *cranberries* desidratadas adoçadas de acordo com a USDA (*United States Department of Agriculture*).

Tabela 1 – Composição físico-química de *cranberries* desidratadas adocicadas

Nutrientes	Unidade	Valor em 100 g
Água	g	15.79
Valor Energético	kcal	308
Proteínas	g	0.17
Lipídeos	g	1.09
Carboidratos	g	82.80
Fibras	g	5.3
Açúcares Totais	g	72.56

Fonte: United States Department of Agriculture 2015 (USDA, 2015).

Tabela 2 – Composição nutricional de *cranberries* desidratadas adoçadas

Nutrientes	Unidade	Valor em 100 g
Cálcio (Ca)	mg	9
Ferro (Fe)	mg	0.39
Magnésio (Mg)	mg	4
Fósforo (P)	mg	8
Potássio (K)	mg	49
Sódio (Na)	mg	5
Zinco (Zn)	mg	0.10
Vitamina C	mg	0.2
Tiamina	mg	0.013
Riboflavina	mg	0.028
Niacina	mg	0.548
Vitamina B-6	mg	0.038
Vitamina A, ERA	µg	2
Vitamina A, IU	IU	46
Vitamina E	mg	2.10
Vitamina K	µg	7.6
Gordura saturadas	g	0.088
Gorduras monoinsaturadas	g	0.298
Gorduras poli-insaturadas	g	0.182
Gordura <i>trans</i>	g	0.003

Fonte: United States Department of Agriculture 2015 (USDA, 2015).

Segundo o Instituto *Cranberry* (2015), as *cranberries* estão disponíveis em uma ampla variedade de formas, incluindo frutas frescas, suco, molho e secas. A fruta fresca é geralmente disponível a partir de setembro a dezembro.

3.2. REIDRATAÇÃO

Em produtos desidratados, a água que foi removida do alimento não é substituída da mesma maneira durante sua reidratação. Alimentos secos em condições ideais sofrem menos danos em suas estruturas (tecidos e células), o que facilita e torna o processo de reidratação mais rápido e eficaz. Assim, a taxa e a extensão da reidratação podem ser utilizadas como indicadores de qualidade da secagem (FELLOWS, 2009)

Durante o processo de reidratação a absorção de água pelos alimentos ocorre de maneira lenta e a textura do material fresco não é recuperada. A absorção de água ocorre mais

rapidamente no início do processo e a taxa de reidratação diminui gradualmente conforme a umidade de equilíbrio vai sendo atingida (FELLOWS, 2009; LEE; FARID; NGUANG, 2006).

A razão entre a massa de material seco e a massa de água pode variar de 1:5 até 1:50, entretanto, os procedimentos experimentais utilizados variam bastante. A temperatura de reidratação com água varia desde a temperatura ambiente até a temperatura de ebulição e o tempo de imersão varia de 2 h até 24 h (LEE; FARID; NGUANG, 2006; LEWICKI, 1998). A água pode ser agitada ou não durante a reidratação e o material reidratado pode ser seco com papel tecido, filtrado utilizando papel filtro e um ligeiro vácuo ou escorrido em um crivo (LEWICKI, 1998).

A reidratação de produtos desidratados ocorre principalmente antes do consumo. Ocorre em três etapas simultaneamente: a embebição de água no material seco, o inchamento dos produtos reidratados e o vazamento de compostos solúveis. Atualmente existe uma grande variedade de produtos desidratados no mercado; devido a este fato, há necessidade e preocupação em atender as especificações de qualidade e conservação de energia, sendo assim, o profundo conhecimento do processo de reidratação é enfatizado com o objetivo de otimizar processos (LEE; FARID; NGUANG, 2006).

Para Vega-Gálvez et al. (2008), produtos desidratados, como a pimenta vermelha, devem ser reidratados para consumo em produtos preparados, como sopas, pizzas e ensopados, porém os tratamentos como a desidratação osmótica, a secagem e a reidratação, podem induzir mudanças, tanto na composição de tecidos vegetais, quanto em sua estrutura. A reidratação de frutas e vegetais desidratadas tem sido amplamente realizada, como pode ser verificado nos estudos conduzidos por Agnieszka e Andrzej (2010) durante a reidratação de morangos, Garcia-Pascual et al. (2006) durante a reidratação de cogumelos e Lewick (1998) durante a reidratação de batata, maçã e raiz de salsa secas.

Muitos estudos têm sido realizados com o intuito de avaliar a taxa de absorção de água de produtos reidratados. Krokida e Marinos-Kouris (2003) avaliaram a taxa de reidratação de frutas (maçãs e bananas) e vegetais (cenouras, pimentas, alhos, cogumelos, ervilhas, milho, tomates, abóboras e cebolas) desidratados, verificando que há influência da temperatura do banho de imersão na taxa de reidratação. Ainda, os autores ajustaram os dados experimentais a modelos cinéticos de primeira ordem. Maldonado, Arnau e Bertuzzi (2010) estudaram a cinética de difusão de água, calculando os coeficientes de difusão de água durante a reidratação de mangas desidratadas. Além disso, os autores avaliaram a relação

entre a água absorvida durante o processo de reidratação e a perda de água durante a secagem, utilizando-se de alguns índices de qualidade, tais como, a capacidade de absorção de água (*Water Absorption Capacity – WAC*), a capacidade de retenção de solutos (*Dry Matter Holding Capacity – DHC*) e a capacidade de reidratação (*Rehydration Ability – RA*). Sendo a difusão a forma de transferência de massa que mais contribui durante os processos de reidratação, os dados experimentais foram adequadamente ajustados à segunda Lei de Fick, possibilitando o cálculo do coeficiente efetivo de difusão da água durante o processo que variou entre $6,8 \cdot 10^{-11} - 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Não foram encontrados estudos que relatem a reidratação de *cranberries* na literatura, sendo assim, o estudo sobre a sua cinética de reidratação é de muita importância, visto o crescimento de seu consumo na forma desidratada.

3.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é uma importante ferramenta de análise durante o processo de secagem e operação dos secadores (CLEMENTE et al., 2011). Durante o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos de secagem, é de grande importância a simulação e a obtenção de informações teóricas à respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (RESENDE, et al., 2010b). Frequentemente é utilizada a teoria da difusão líquida, conhecida como segunda Lei de Fick, para calcular o coeficiente de difusão efetivo da água durante a secagem (DE SOUZA et al., 2011).

De acordo com Falade e Abbo (2007) a segunda Lei de Fick da difusão em estado estacionário, resultante da negligência dos efeitos da temperatura e dos gradientes de pressão total, é utilizada para descrever o transporte de água durante os processos de desidratação de alimentos, que ocorrem durante o período de taxa decrescente, no qual a difusão da água do interior do produto até sua superfície é o mecanismo de transferência de massa predominante.

Como apontado por Lee et al. (2006), a maioria dos trabalhos relacionados à modelagem da reidratação, tratam a operação com base na segunda Lei de Fick. Nesse caso, os dados experimentais de secagem/reidratação para a determinação dos coeficientes efetivos de difusão da água são calculados a partir da segunda Lei de Fick, Equação 1.

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D_{ef} \left(\frac{\delta^2 M}{\delta x^2} \right) \quad (1)$$

Em que: M representa a umidade no tempo t ; D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo da água, em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; x é a distância da superfície até o centro da geometria adotada.

Crank (1975) solucionou a Lei de Fick, Equação 1, para alguns sólidos de forma geométrica simples e constante ao longo do processamento, tais como uma esfera. A solução analítica de Crank (1975) é apresentada na Equação 2.

$$RX = \frac{6}{\pi^2} \left[e^{(-\pi^2 F_0)} + \frac{1}{4} e^{(-4\pi^2 F_0)} + \frac{1}{9} e^{(-9\pi^2 F_0)} + \frac{1}{16} e^{(-16\pi^2 F_0)} + \dots \right] \quad (2)$$

$$= f(F_0)_{\text{esfera}}$$

F_0 é o número de Fourier, determinado a partir da Equação 3.

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

Em que: D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo da água; t é o tempo de secagem; r é o raio da esfera.

RX representa a umidade adimensional e é determinada pela Equação 4 a partir dos dados experimentais.

$$RX = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (4)$$

Em que: \bar{X}_t é a umidade em cada intervalo de tempo; X_{eq} é a umidade de equilíbrio após certo tempo de secagem/reidratação, X_0 é a umidade inicial do sólido; RX é o adimensional de umidade

Hebbar e Rastogi (2001) e Falade e Abbo (2007), ao estudar a cinética de secagem de castanhas de caju e a de secagem/reidratação de tâmaras, respectivamente, utilizaram uma

modificação da Equação 2, uma vez que o formato dos sólidos não era perfeitamente esférico e verificaram que, a Lei de Fick representou de forma satisfatória os dados experimentais de secagem e reidratação. Para a secagem das castanhas, o coeficiente de difusão efetiva da água aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem e variou entre $(0,948 \cdot 10^{-9} - 2,200 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$ nas faixas de temperatura entre 100 e 120 °C. Para a secagem das tâmaras, a Lei de Fick apresentou coeficientes de correlação R^2 entre (0,990 - 0,996), sendo encontrados os menores valores para os coeficientes de difusão efetiva da água e os maiores valores de energia de ativação para as amostras reidratadas do que para as amostras desidratadas.

Assim, a Equação 5 foi utilizada para a modelagem da reidratação das *cranberries* desidratadas no presente estudo.

$$RX = \frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ef} t}{\psi^2 R_{eq}^2}\right) \quad (5)$$

Em que: \bar{X}_t é a umidade em cada intervalo de tempo; X_{eq} é a umidade de equilíbrio após certo tempo de secagem/reidratação, X_0 é a umidade inicial do sólido; RX é o adimensional de umidade; R_{eq} é o raio equivalente, em cm; ψ é a esfericidade; D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo da água durante a reidratação das *berries*, em $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

Para longos períodos de secagem/reidratação, a série representada pela Equação 2 converge rapidamente. Assim, é possível calcular o coeficiente de difusão graficamente a partir da linearização do primeiro termo da série representada pela Equação 5, como proposto por Vieira et al. (2012) ao avaliar a cinética de liofilização de fatias de abacaxi de diferentes espessuras submetidas a diferentes taxas de congelamento. Os autores verificaram que a difusividade efetiva no período inicial da liofilização ($t \leq 7,5 \text{ h}$) foi fortemente influenciada pelas condições de congelamento da fatia, o que influenciou diretamente nas taxas de transferência de massa. As difusividades efetivas encontradas para as placas de 0,5, 1,0 e 1,5 cm foram 3,52, 5,90 e $5,85 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, sendo os maiores valores encontrados para as fatias de maior espessura, em temperatura de congelamento intermediária (-24 °C).

Embora existam teorias para prever o comportamento de secagem de alimentos, é frequente a utilização de modelos empíricos e/ou semiempíricos para descrever a difusão da água durante a secagem (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Os modelos semi-empíricos baseiam-se na Lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa, considerando que as condições de processo sejam isotérmicas e que a transferência de água se restrinja somente à superfície do produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992). Entre os modelos semi-empíricos destacam-se os modelos de Page, Henderson e Pabis e Dois Termos (PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

Os modelos empíricos baseiam-se nas condições externas de processo (temperatura e velocidade do ar de secagem e razão de umidade) e consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser observados em laboratório (QUEIROZ; PEREIRA; MELO, 1995). Dentre os modelos empíricos, destacam-se os modelos de Thompson e Wang e Singh (MARTINAZZO et al., 2007).

De acordo com Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1992) e Resende et al. (2010b), a validade destes modelos está restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos, pois, estes modelos geralmente baseiam-se nas condições externas ao produto, e levam em consideração que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente, não fornecendo informações sobre os fenômenos de transferência de água no interior dos mesmos.

Os modelos empíricos e semi-empíricos têm sido utilizados por diversos autores para descrever a secagem de alimentos, como é possível verificar nos experimentos realizados por De Sousa et al. (2011), ao avaliarem a cinética de secagem de nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*), tendo verificado o ajuste pelo modelo de Midilli aos dados experimentais; Resende et al. (2010b), ao avaliarem a cinética de secagem de clones de café (*Coffea canephora Pierre*) em terreiro de chão batido, que verificaram o melhor ajuste aos dados experimentais de secagem pelos modelos de Verma e Aproximação da Difusão; Goyalde et al. (2009) ao avaliarem a cinética de secagem de pedaços de cana-de-açúcar, tendo verificado melhor ajuste pelo modelo de Midilli; e Resende et al. (2010a) ao avaliarem a cinética de secagem de feijão adzuki (*Vigna angularis*), que utilizaram os modelos de Midilli e Henderson e Pabis modificado para representar os dados experimentais.

Apesar de não ser usual para experimentos de reidratação, foram utilizados 12 modelos empíricos e semi-empíricos, além da Lei de Fick, para descrever a reidratação das *cranberries*. Os modelos utilizados encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem/reidratação de alimentos

	Modelo	
Wang e Sing	$RX = 1 + at + bt^2$	(6)
Verma	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-k_1t}$	(7)
Thompson	$RX = e^{\left(\frac{-a-(a^2+4bt)^{0,5}}{2b}\right)}$	(8)
Page	$RX = e^{-kt^n}$	(9)
Newton	$RX = e^{-kt}$	(10)
Midilli	$RX = ae^{-kt^n} + bt$	(11)
Logarítmico	$RX = ae^{-kt} + c$	(12)
Henderson e Pabis	$RX = ae^{-kt}$	(13)
Henderson e Pabis modificado	$RX = ae^{-kt} + be^{-k_0t} + ce^{-k_1t}$	(14)
Exponencial de Dois Termos	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kat}$	(15)
Aproximação da Difusão	$RX = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kbt}$	(16)
Lei de Fick	$RX = \frac{6}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{R_{eq}^2 \Psi^2}\right)}$	(5)

Em que: RX representa o adimensional de umidade; t , o tempo de secagem, em h; k , k_0 e k_1 são as constantes de secagem, em t^{-1} ; a , b , c e n são os coeficientes dos modelos; R_{eq} é o raio equivalente, em cm; ψ é a esfericidade; D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo da água ou leite durante a reidratação das *berries*, em $cm^2 s^{-1}$.

3.4. PERFIL DE TEXTURA

Além do aspecto visual, alguns outros atributos definem a qualidade de um produto, como o sabor, o aroma e a textura. O sabor é tradicionalmente um dos principais atributos que define a aceitabilidade, entretanto, a textura tem sido amplamente relacionada, como sendo o atributo responsável por sua rejeição (CARDELLO, 1996).

Devido aos danos causados pelas operações de desidratação e reidratação, mudanças na textura destes produtos ocorrem, conforme é mencionado por Lee, Farid e

Nguang (2006). Logo, o estudo das propriedades mecânicas deste tipo de produto se torna essencial para verificar a influência destas operações sobre a qualidade de frutas e vegetais.

Atualmente, a denominação mais aceita para textura é: “Uma manifestação sensorial e funcional das propriedades estruturais, mecânicas e de superfícies de alimentos detectadas através dos sentidos da visão, audição, tato e cinestésicos” (SZCZESNIAK, 2002).

Existem diversos métodos de medição de textura, como a utilização de um painel sensorial treinado e técnicas instrumentais, sendo a técnica de compressão a mais comum (HARKER et al., 1997).

Um dos testes mais comuns que são utilizados para a determinação de parâmetros de textura são os testes de compressão, que são comumente chamados de TPA (*Texture Profile Analysis*), sendo que neste teste a amostra é submetida à compressão consecutiva, conforme apresentado na Figura 4 imitando um movimento do maxilar (SAHIN; SUMNU, 2006). Dessa forma, é possível obter curvas de Força-Deformação, Figura 3, e, assim, determinar alguns atributos, tais como, dureza, fraturabilidade, elasticidade, coesividade, aderência, gomosidade e mastigabilidade. (ROSENTHAL, 2010; SAHIN; SUMNU, 2006). Segundo Rosenthal (2010) e Szczesniak (1963) existe uma grande correlação entre a avaliação sensorial e o TPA.

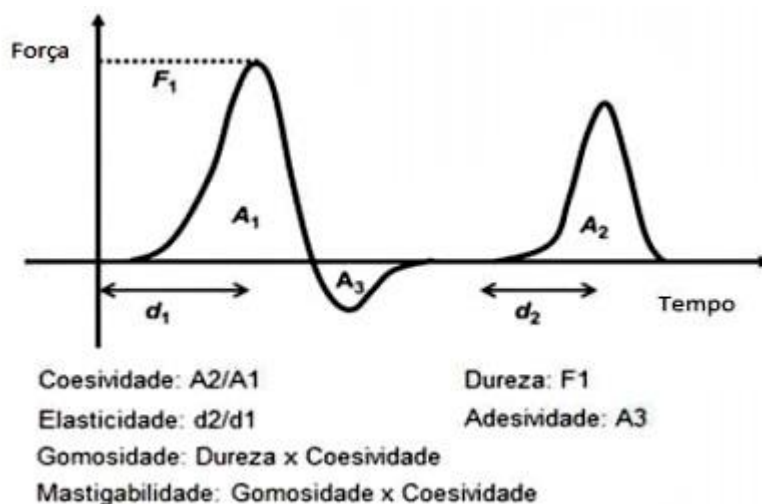


Figura 3 – Curva típica de uma análise instrumental de textura (TPA)
Fonte: Silva (2013).



Figura 4 – Análise instrumental de textura (TPA) da *cranberry* desidratada
Fonte: Próprio autor.

Estudos realizados recentemente avaliaram as principais mudanças que ocorrem na textura de frutas durante seu desenvolvimento, amadurecimento e armazenamento. Giongo et al. (2013) avaliaram a textura de *blueberries* (*Vaccinium ssp.*) ressaltando que a textura das frutas, em geral, está fortemente relacionada com o conceito de frescor e qualidade, sendo umas das características mais apreciadas pelos consumidores de *blueberries*, que a consideraram mais importante do que seu preço.

Duarte-Molina et al. (2016) avaliaram a qualidade de morangos armazenados sob luz pulsada e sua influência sobre a degradação por fungos, a perda de água e as propriedades mecânicas e verificaram que não houve diferenças significativas nos valores de força de ruptura máxima, trabalho mecânico e módulo de deformabilidade entre os frutos tratados e não tratados imediatamente após os tratamentos. Após 8 dias de armazenamento a 6 °C, os morangos não tratados com luz pulsada, mostraram um amaciamento (redução de aproximadamente 48% na força de ruptura máxima). Já os morangos armazenados e expostos durante 10 e 40 s sob a luz pulsada, não apresentaram alterações significativas nos parâmetros mecânicos no dia 0, enquanto que, os valores da força de ruptura máxima e do trabalho mecânico nas amostras tratadas por 20 s com luz pulsada aumentaram cerca de 35 e 88% em comparação àquelas a 0 dias de armazenamento.

Harker et al. (1997) compararam métodos instrumentais e sensoriais de medição de textura de frutas (banana, melancia, melão, abacate e maçã) e vegetais (cenoura). Os autores verificaram que as medidas de resistência à tração, à perfuração e ao cisalhamento, apresentaram uma relação curvilínea com as avaliações sensoriais da dureza do tecido, sendo esta relação fundamental para a base psicofísica da percepção humana da textura.

Le Moigne et al. (2008) compararam a medição da textura por métodos instrumentais e sensoriais durante o amadurecimento de uvas, verificando que os parâmetros de compressão foram úteis para acompanhar as propriedades texturais durante a maturação das uvas e foram altamente correlacionados com atributos de textura sensorial, sendo possível fornecer uma descrição consistente do tipo de maturação.

Assim, a determinação das propriedades mecânicas *das cranberries* reidratadas, como mencionado no estudo de Giongo et al. (2013) com *blueberries*, é de grande importância, visto que, a textura está diretamente relacionada à qualidade e aceitação deste tipo de produto pelos consumidores.

É possível encontrar na literatura discussões sobre como a textura está relacionada à microestrutura dos alimentos, às propriedades reológicas e às percepções sensoriais, Quadro 1, observadas pelos consumidores, os quais percebem diferenças sutis na textura e estas, por sua vez, são utilizadas como um fator determinante para a aceitabilidade de um produto alimentar (CONTADOR; SHYNIA; INFANTE, 2015).

De acordo com Aguilera (2005), ao discutir aspectos microestruturais em alimentos e sua relação com o processamento, é necessário conhecer a natureza e as propriedades do produto, pois os métodos de processamento promovem mudanças na microestrutura dos mesmos, afetando atributos sensoriais, como a cor, o sabor e a textura. Para alimentos desidratados a textura é o atributo mais afetado, devido ao encolhimento ocasionado pela remoção de água durante a secagem, que mesmo aumentando a vida útil do produto, torna-o menos atrativo visualmente.

A percepção da textura, ao contrário dos atributos sensoriais, sabor e cor envolve três sentidos atuando simultaneamente: tato, visão e audição. Desta forma, a maioria das percepções associadas à textura ocorre quando os alimentos são manipulados, mastigados e movidos entre os receptores da boca (SZCZESNIASK, 2002).

Para Infante, Martíez-Gomez e Predieri (2008, 2011), a avaliação sensorial continua sendo o método mais importante para a avaliação da textura, desempenhando um papel fundamental em programas de melhoramento destinados a produzir características

complexas de frutas, que são essenciais para atingir os níveis mais altos de qualidade. Entretanto, devido ao seu alto custo, e o grande desenvolvimento das análises reológicas, as análises instrumentais de textura, mostram-se como uma alternativa viável na determinação dos parâmetros de textura, uma vez que, como mencionado por Rosenthal (2010) e Szczesniak (1963) possui uma forte correlação com a análise sensorial.

As definições dos parâmetros de textura encontram-se apresentadas no Quadro 1.

	Físicas	Sensoriais
Dureza	Força necessária para atingir uma dada deformação.	Força requerida para compressão do alimento entre os dentes molares.
Fraturabilidade	É a força na ruptura observada no primeiro ciclo da compressão.	Força pela qual uma amostra esmigalha ou quebra.
Coesividade	Resistência das ligações internas que compõem o corpo do produto.	Grau em que uma substância é comprimida entre os dentes antes de romper.
Elasticidade	Grau em que a amostra retorna sua forma original após compressão.	Grau para qual um produto volta a sua forma original, depois da compressão com os dentes.
Adesividade	É a quantidade de força requerida para simular o trabalho necessário que sobreponha as forças de atração entre a superfície do alimento e a superfície em contato com este.	Força requerida para remover o material que adere a boca durante o processo normal de comer.
Mastigabilidade	É a energia requerida para desintegrar um alimento sólido até o ponto de ser engolido.	Tempo necessário para mastigar uma amostra (velocidade constante) para reduzi-la a consistência adequada para deglutição.
Gomosidade	É a energia requerida para se desintegrar um alimento semissólido ao ponto de ser engolido.	Força necessária para desintegrar a massa do alimento, obtida durante a mastigação, até que atinja o ponto de engolir.

Quadro 1 – Definições dos parâmetros de textura

Fonte: Adaptado de Silva (2013), Civille e Szczeniask (1973).

3.5. REOLOGIA

A reologia é a ciência que estuda a deformação de objetos quando estes são submetidos à aplicação de forças. As propriedades reológicas são determinadas medindo a força e a deformação como uma função do tempo (FELLOWS, 2009). A reometria é a análise que permite conhecer o comportamento reológico dos fluidos e suas aplicações em diferentes áreas da indústria (IBARZ; BARBOSA-CANÓVAS, 2003).

De uma maneira geral, pode-se fazer uma distinção no comportamento reológico dos alimentos e classificá-los em fluidos newtonianos e não newtonianos. Fluidos em que a

viscosidade é dependente da taxa de deformação são chamados de fluidos não newtonianos. Um grande número de fluidos apresenta este tipo de comportamento (BATTAGLINI; RAZUK, 2010; IBARZ; BARBOSA-CANÓVAS, 2003)

O comportamento de um fluido é definido através de um modelo matemático, que relaciona como a tensão de cisalhamento varia com a taxa de deformação (TONELI et al., 2005). A utilização de modelos matemáticos permite representar uma grande quantidade de dados reológicos em uma expressão matemática simples (STEFFE; DAUBERT, 2006). Entretanto, de acordo com Šimuněk et al. (2014) existe uma série de desafios para a obtenção de medidas reológicas, sendo os viscosímetros rotacionais e de vibração as técnicas de medição mais utilizadas para este fim. Ambas são baseadas na deformação controlada da amostra.

Ferreira, Guimarães e Maia (2008) avaliaram o comportamento reológico da polpa de cupuaçu integral na faixa de temperatura de 10 °C a 60 °C e observaram que as curvas de escoamento foram bem ajustadas pelos modelos de Ostwald de Waele e Herschel-Bulkley. Entretanto, o modelo de Ostwald de Waele foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, sendo que o índice de comportamento (n) foi inferior a 1, representando comportamento pseudoplástico. Ajuste semelhante foi encontrado por Chanvrier et al. (2007) ao avaliar as propriedades reológicas de farinha de trigo processada em baixos níveis de hidratação.

Estudos sobre a reologia de suspensões de *berries* têm sido realizados a fim de explicar como os parâmetros concentração de sólidos e temperatura interferem no comportamento reológico. Nindo et al. (2007) caracterizaram o comportamento reológico de suspensão de sólidos de *blueberries* a 10, 15, 20 e 24 °Brix. Os autores verificaram que a concentração de sólidos e a temperatura influenciam significativamente a viscosidade dos purês nas faixas de temperatura e concentração utilizadas. O modelo de Sisko apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais com $R^2 > 0,99$. A energia de ativação (E_a) variou linearmente ($R^2 = 0,98$) com a concentração de sólidos dissolvidos, exibindo aumento, exceto para os experimentos a 25 °Brix. A viscosidade aparente foi expressa como uma função da concentração de sólidos, sendo esta relação importante, pois possibilita o monitoramento das mudanças na viscosidade durante os processos de evaporação, por exemplo.

Kechinski et al. (2011) avaliaram a influência da temperatura e das concentrações de gomas xantana e frutose sobre o comportamento de escoamento de *blueberries*. Os pesquisadores verificaram que os purês adicionados de gomas, apresentaram respostas

tixotrópicas e caracterizaram seu comportamento reológico como pseudoplástico. O melhor ajuste dos dados experimentais foi realizado pelo modelo de Casson e o comportamento reológico das *berries* apresentou uma complexa dependência com a concentração dos aditivos e aumento da temperatura. Ainda, a concentração de goma xantana mostrou-se como uma variável determinante do comportamento reológico dos purês. Já a concentração de frutose teve um efeito pronunciado sobre a tixotropia, porém, não influenciou significativamente a viscosidade das amostras.

Šimuněk et al. (2014) avaliaram o comportamento reológico de néctares e sucos de maçãs, *cranberries* e *blueberries* com tratamento ultrassônico e ajustaram os dados experimentais ao modelo de Ostwald de Waelle. Os pesquisadores verificaram que as amostras apresentaram comportamento não-newtoniano, dilatante ($n > 1$) e observaram que o índice de consistência variou de acordo com as faixas de tratamento ultrassônico aplicadas.

Nindo et al. (2005) caracterizaram o comportamento reológico de sucos de *blueberries* e *raspberries* e verificaram que ambos apresentaram comportamento Newtoniano nas faixas de temperatura e concentração avaliadas, porém, os sucos de *raspberries* apresentaram um leve aumento na viscosidade em relação aos sucos de *blueberries* a altas concentrações de sólidos.

Apesar dos inúmeros estudos sobre o comportamento reológico de polpas, sucos, néctares ou suspensões de sólidos de diversas frutas, não foram encontrados na literatura estudos sobre a influência da concentração de sólidos e da temperatura no comportamento reológico de suspensão de sólidos de *berries* desidratadas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

As *cranberries* desidratadas e o leite integral da marca Frimesa foram adquiridos no comércio local de Medianeira – PR, entre os meses de janeiro a julho de 2016.

4.2. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Foram realizadas, em triplicata, as seguintes análises da *cranberry* desidratada, reidratada em água e reidratada em leite, por 45 min em 29 °C: teores de água, proteínas, cinzas e atividade de água (a_w).

O tempo (45 min) e a temperatura (29 °C) de reidratação foram selecionados com base nos procedimentos de reidratação. O tempo de reidratação foi definido com base no ganho de “solvente” (água ou leite) pela amostra e considerando que longos tempos de reidratação seriam não usuais na prática. A temperatura foi selecionada visando o menor gasto energético, visto que as temperaturas médias no Brasil frequentemente encontram-se por volta de 29 °C.

A umidade, o conteúdo mineral e o teor de proteínas das amostras foram determinados segundo metodologia proposta pela ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC, 1995). Para a determinação de proteínas foi utilizado o fator de correção de 5,75.

As análises de atividade de água foram realizadas com auxílio do equipamento medidor de atividade de água (AquaLab, São José dos Campos – SP, Brasil).

4.3. CINÉTICA E MODELAGEM DA REIDRATAÇÃO

A reidratação das *cranberries*, Figura 5, foi realizada segundo metodologia adaptada de Falade e Abbo (2007) e Vega-Gálvez et al. (2008). O processo foi realizado em triplicata em bequeres utilizando a proporção de 1:40 (massa de fruta: massa de fluido) em água e em leite a três temperaturas: geladeira (10 ± 2 °C), (29 ± 2 °C) e a 45 ± 2 °C com o auxílio de uma BOD (Cienlab, Campinas - SP, Brasil).

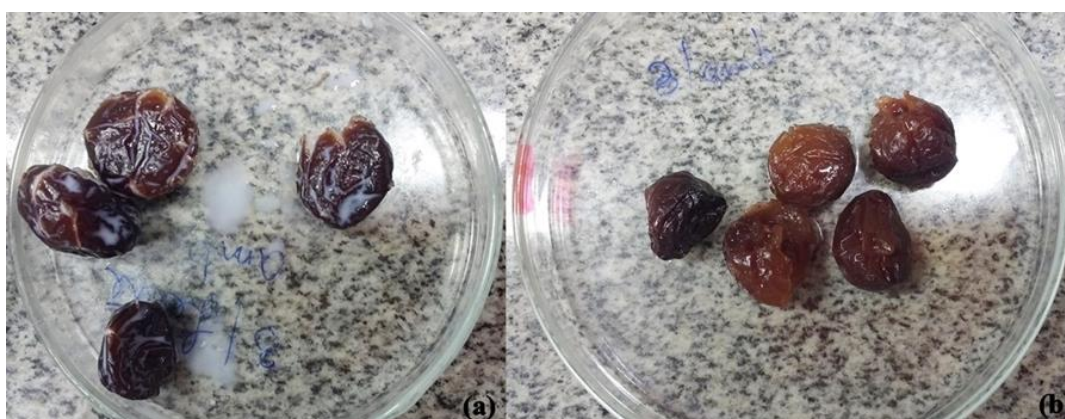


Figura 5 – (a) *Cranberries* reidratadas em leite e (b) reidratadas em água à 29 °C por 45 min
Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, 5 g de *cranberry* foram colocados em bequeres, previamente secos e tarados, e adicionou-se 200 mL de leite ou água. Os ensaios de reidratação com leite foram realizados na temperatura de 10 °C e na temperatura ambiente (29°C); enquanto que os ensaios com água, além das temperaturas citadas, também foram realizados a 45 °C.

Pesagens sucessivas foram realizadas para acompanhar a cinética de reidratação das frutas, de 45 em 45 min nas primeiras três horas de processo, de hora em hora até completar seis horas de reidratação. As umidades de equilíbrio foram determinadas por método dinâmico após 16 h de reidratação das *cranberries*. Foi realizada ligeira remoção da umidade superficial das frutas com papel absorvente, cuidadosamente, antes da pesagem. Os dados experimentais do ganho de massa das *berries* foram trabalhados e ajustados aos doze modelos matemáticos apresentados na Tabela 3.

A modelagem segundo a Lei de Fick, Equação 1, foi realizada considerando as *cranberries* como esferas e inserindo a esfericidade no equacionamento, Equação 5, como proposto por Falade e Abbo (2007) e Hebbar e Rastogi (2001). O cálculo do coeficiente de difusão efetivo da água foi realizado utilizando o primeiro termo da solução integrada de

Crank (1975) para esferas, 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).

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para cada um dos coeficientes de difusão efetivos determinados experimentalmente e, para os estatisticamente significativos, aplicou-se o teste de Tukey para verificar a existência de diferenças significativas entre os parâmetros determinados.

Além da Lei de Fick, outros modelos empíricos/semiempíricos foram utilizados para descrever a reidratação das *cranberries* desidratadas, os quais estão apresentados na Tabela 3.

A esfericidade das frutas ao longo do tempo de reidratação foi determinada segundo Falade e Abbo (2007) e Hebbar e Rastogi (2001), tendo sido medidos os raios maior (a) e menor (b) dos semi eixos de cada fruta durante a reidratação, de forma a determinar um valor médio para cada processo de reidratação. Esses dados foram utilizados para calcular o raio equivalente (R_{eq}) e a esfericidade das frutas (Ψ), a partir das Equações 17 a 23.

$$R_e = \frac{3V_p}{S_p} = \Psi R_{eq} \quad (17)$$

$$V_p = \frac{4}{3}\pi a^2 b \quad (18)$$

$$S_p = 2\pi a^2 + \left(\frac{\pi b^2}{e}\right) \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \quad (19)$$

$$e = \left[1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2\right]^{1/2} \quad (20)$$

$$S_e = 4\pi R_e^2 \quad (21)$$

$$\Psi = \frac{S_e}{S_p} \quad (22)$$

$$R_{eq} = \frac{R_e}{\Psi} \quad (23)$$

Em que: R_e é o raio da esfera; V_p e S_p são o volume e a área superficial da fruta; Ψ é a esfericidade das frutas; R_{eq} é o raio equivalente das *cranberries*, 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, Equações 6 a 16, foram obtidos por meio de regressão não-linear, com auxílio do software STATISTICA 7.0 que utiliza o método dos quadrados mínimos (Gauss-Newton) para ajustar os dados experimentais, utilizando-se um critério de convergência de $1 \cdot 10^{-6}$; a Lei de Fick, Equação 5, foi ajustada aos dados experimentais através da linearização da Equação 5, com o auxílio do Excel (Office 2013).

Para a verificação do ajuste dos modelos, Equação 5 e 6 a 16, aos dados experimentais foram avaliados a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), do erro quadrático médio ($RMSE$) e os valores do erro médio relativo (P), os últimos calculados segundo as Equações 24 e 25, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{calc} - x_{exp})^2}{n}} \quad (24)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^N \frac{|x_{exp} - x_{calc}|}{x_{exp}} \quad (25)$$

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

De acordo com Rudy et al. (2015) baixos valores de $RMSE$ e R^2 próximos a 1 denotam um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. De acordo com Krokida e Marinos-Kouris (2003) o erro médio relativo indica o erro relativo das predições, e valores abaixo de 10% são indicativos de um ajuste razoável para fins mais práticos.

Os parâmetros estatísticos para verificação do ajuste dos modelos aos dados experimentais foram calculados utilizando o Excel (Office 2013).

4.4. PERFIL DE TEXTURA

As propriedades mecânicas das *berries* desidratadas e reidratadas por 45 min a 29 °C em leite e água foram determinadas em um texturômetro universal modelo TA-HD PLUS (Stable Microsystems, Godalming – Surrey, UK; Figura 6), segundo metodologia adaptada de Giongo et al. (2013) e Jridi et al. (2015). Nestes ensaios foi utilizada uma carga de célula de 5 kg, um probe cilíndrico de 4 mm de diâmetro e as seguintes configurações instrumentais: pré-velocidade de compressão de 40 mm/min; velocidade de compressão de 40 mm/min e pós-velocidade de compressão de 100 mm/min. As amostras foram comprimidas duas vezes até 50% de deformação. Foram avaliadas oito replicatas de cada amostra.

Foi realizada a análise de variância (ANOVA) para cada um dos parâmetros de textura determinados experimentalmente e, para os estatisticamente significativos, aplicou-se o teste de Tukey, baseado na diferença entre médias para verificar a existência de diferenças significativas entre os resultados dos parâmetros testados.



Figura 6 – Texturômetro universal, utilizado para a medição instrumental de textura das *berries*

Fonte: Próprio autor.

4.5. REOMETRIA

As análises reológicas foram conduzidas em um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos da marca Brookfield (Middleboro – MA, USA; Figura 7), modelo LV DV – III ULTRA, segundo metodologia adaptada de Nindo et al. (2007) e Kechinski et al. (2011).

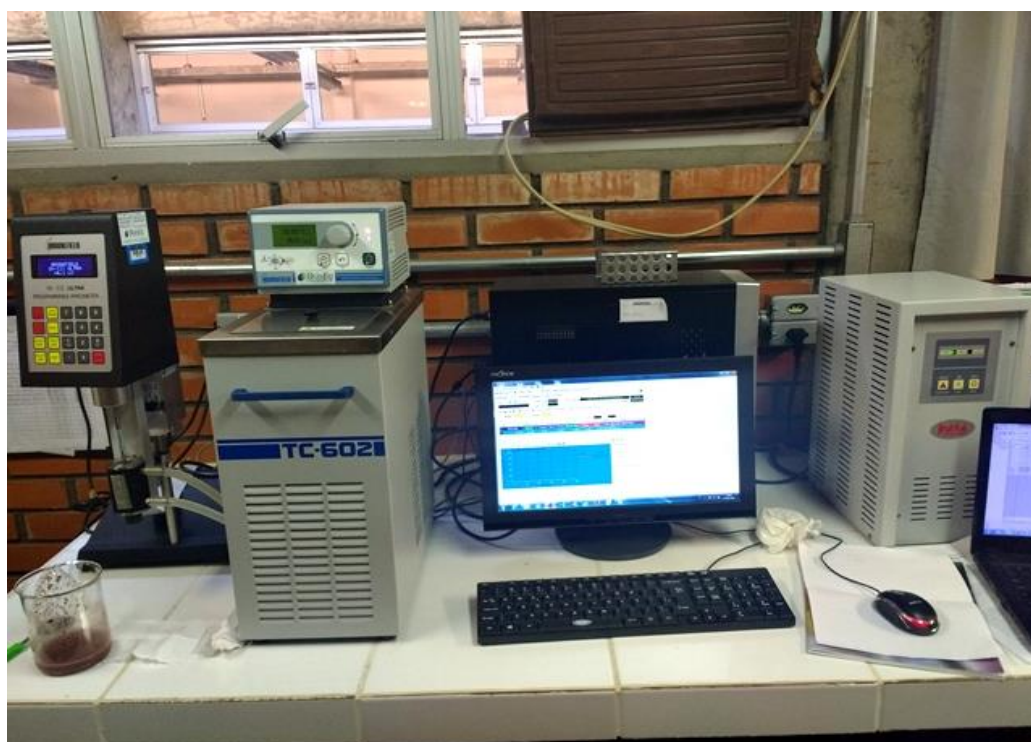


Figura 7 – Viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos, utilizado para determinação dos parâmetros reológicos das *berries*
Fonte: Próprio autor.

Os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram coletados para suspensões de sólidos de *cranberries* nas concentrações de 10, 20 e 30 g de sólidos dissolvidos por 100 g de amostra na faixa de temperatura entre 20 e 60 °C.

O preparo das suspensões foi realizado pesando-se 10, 20 e 30 g de *berries* inteiras (após a reidratação) em béqueres devidamente pesados e tarados e adicionando-se água destilada até completar 100 g. Posteriormente, as frutas foram trituradas, para originar as

suspensões, com auxílio de um *mixer* para alimentos da marca Black & Decker, Towson – MD USA. Esse procedimento foi realizado imediatamente antes das análises.

Para avaliar a influência da concentração de sólidos e da temperatura no comportamento reológico das suspensões de *cranberry* foi realizado um planejamento fatorial completo 2^2 com três pontos centrais, como descrito posteriormente.

O viscosímetro foi calibrado para permitir o equilíbrio da amostra com a temperatura escolhida antes da coleta dos dados, sendo escolhido um passo de 3 min entre uma leitura e outra. Durante o bombeamento de fluidos em tubos de escoamento e agitação de misturas alimentícias líquidas, as taxas de cisalhamento variam na faixa de 10 e 1000 s^{-1} , por este motivo, as medidas reológicas devem ser realizadas nestas faixas, as quais abrangem a maioria das aplicações (NINDO et al., 2007).

Foram utilizados cinco modelos, apresentados na Tabela 4 para representar o comportamento reológico das suspensões de *cranberries*: o modelo de Ostwald de Waelle ou Lei da Potência, Equação 26, Newton, Equação 27, Herschel-Bulkley, Equação 28, Casson, Equação 29 e Bingham, Equação 30.

Tabela 4 – Modelos matemáticos utilizados para prever o comportamento reológico de alimentos

Modelo		
Ostwald de Waelle ou Lei da Potência	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	(26)
Newton	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	(27)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K_H\dot{\gamma}^{n_H}$	(28)
Casson	$\tau^{0.5} = K_{0c}^{0.5} + K_c(\dot{\gamma})^{0.5}$	(29)
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu_{pl}(\dot{\gamma})$	(30)

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; η_a é a viscosidade aparente, em Pa·s; η_∞ é a viscosidade a uma taxa de deformação infinita, 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 consistência dos fluidos).

Os parâmetros reológicos foram obtidos por meio de regressão não-linear, com auxílio do software STATISTICA 7.0 que utiliza o método dos quadrados mínimos (Gauss-Newton) para ajustar os dados experimentais, utilizando-se um critério de convergência de $1 \cdot 10^{-6}$.

O ajuste dos modelos reológicos, Equações 26 a 30, aos dados do comportamento reológico das suspensões foi realizado com base no coeficiente de determinação (R^2), no erro quadrático médio ($RMSE$, Equação 24), no erro médio relativo (P , Equação 25), no *bias factor* (B_f , Equação. 31) e na existência de tensão de cisalhamento inicial (τ_0).

O *bias factor* (B_f) avalia o acordo global entre os valores observados e preditos, verificando se tais previsões encontram-se acima ou abaixo da linha de equivalência. Uma perfeita concordância entre os valores observados e preditos fornecem um B_f de 1.0 (BETTS; WALKER, 2004).

$$B_f = 10^{\left[\frac{\log \frac{y_c}{y_m}}{\sum \frac{y_m}{n}} \right]} \quad (31)$$

Em que: y_m é o valor experimental, y_c é o valor predito pelo modelo; n é o número de observações experimentais.

Os parâmetros estatísticos para verificação do ajuste dos modelos reológicos aos dados experimentais foram calculados utilizando o Excel (Office 2013).

4.6. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar o efeito das variáveis independentes de processo: temperatura de medição do comportamento reológico (x_1) e concentração de sólidos das suspensões de *cranberries* reidratadas (x_2) foi realizado um planejamento fatorial 2^2 com três repetições no ponto central. As variáveis respostas foram escolhidas com base no melhor ajuste dos modelos propostos, Equações 26 a 30, Tabela 4, aos dados experimentais, sendo que o

modelo de Casson apresentou o melhor ajuste. Assim, as respostas avaliadas foram: a viscosidade plástica de Casson (K_c) e a tensão de cisalhamento inicial de Casson (K_{0c}), conforme apresentado na Tabela 5.

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

Os resultados obtidos foram tratados 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 *cranberries* em função das variáveis temperatura e concentração de sólidos dentro das faixas estudadas. A adequação dos modelos foi avaliada a partir da análise de variância (ANOVA) em um intervalo de confiança de 95% ($p \leq 0,05$) obtendo-se as superfícies de resposta e curvas de contorno para as variáveis respostas em função das variáveis independentes estudadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

As características físico-químicas das *cranberries* desidratadas e das reidratadas a 29 °C com água e com leite por 45 min estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características físico-químicas das *cranberries* desidratadas e reidratadas em água e em leite a 29 °C por 45 min

Amostra	Umidade (%)	Cinzas (%)	Atividade de água	Proteínas (%)
Desidratada	19,98 ± 0,40 ^a	0,24 ± 0,03 ^a	0,5962 ± 0,0174 ^a	0,37 ± 0,04 ^a
Reidratada em água	29,20 ± 0,87 ^a	0,21 ± 0,02 ^{a,b}	0,9050 ± 0,0322 ^b	0,31 ± 0,10 ^a
Reidratada em leite	26,33 ± 0,27 ^a	0,29 ± 0,01 ^{a,b}	0,8251 ± 0,0850 ^b	0,65 ± 0,1 ^b

Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

Verificou-se que a umidade e a atividade de água das *berries* desidratadas apresentam valores reduzidos, como o esperado para um produto desidratado.

O teor de cinzas e de proteínas encontrado nas *cranberries* desidratadas foi similar ao encontrado em *blueberries* por Silveira et al. (2007), cujos teores foram de $0,19 \pm 0,01\%$ e $0,57 \pm 0,04\%$, respectivamente.

Após a reidratação, verificou-se aumento significativo na umidade e atividade de água das frutas, como esperado. Ainda, verificou-se que o teor de proteínas das *cranberries* reidratadas por 45 min em leite a 29 °C foi significativamente maior que o determinado nas frutas desidratadas e nas reidratadas em água a 29 °C, indicando que houve difusão de aminoácidos do leite para a fruta.

5.2. CINÉTICA DE REIDRATAÇÃO

Na Tabela 7 estão apresentados os coeficientes de difusão da água, calculados pela Equação 5, durante a reidratação das *cranberries* nas diferentes temperaturas. Também

estão apresentados na Tabela 7 os parâmetros estatísticos utilizados para averiguar o ajuste da Lei de Fick aos dados experimentais.

Tabela 7 – Coeficiente de difusão da água durante a reidratação de *cranberries* em diferentes temperaturas e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais

	Temperatura	D_{ef} (cm ² s ⁻¹)	R^2	P	$RMSE$
Água	10°C	$8,33 \cdot 10^{-5} \text{ }^b \pm 7,70 \cdot 10^{-6}$	0,94	23,49	0,24
	29°C	$9,35 \cdot 10^{-5} \text{ }^b \pm 1,63 \cdot 10^{-5}$	0,96	23,26	0,24
	45°C	$1,25 \cdot 10^{-4} \text{ }^a \pm 2,23 \cdot 10^{-5}$	0,96	20,87	0,23

Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

Verificou-se que a difusão da água foi influenciada pela temperatura, apresentando aumento com o aumento da temperatura. Os coeficientes de difusão da água nas frutas quando a reidratação foi realizada a baixas temperaturas não apresentaram diferença significativa entre si, porém foram significativamente menores que a difusividade a 45 °C.

Embora, os valores de P tenham sido maiores que 10%, verificou-se que a Lei de Fick ajustou-se de forma satisfatória aos dados experimentais, pois os coeficientes de determinação (R^2) foram maiores que 0,90 e os de $RMSE$ foram próximos de zero.

Maldonado e Bertuzzi (2010) avaliaram os efeitos da temperatura de reidratação e da aplicação de pré-tratamentos (desidratação osmótica em sacarose e glicose) previamente à secagem convectiva sobre o coeficiente de difusão efetivo da água durante a reidratação de mangas desidratadas. Foi verificado aumento no coeficiente de difusão com o aumento da temperatura de reidratação: $1,24 \cdot 10^{-10} \pm 0,03$ (25 °C), $1,6 \cdot 10^{-10} \pm 0,2$ (40 °C) e $6,8 \cdot 10^{-11} \pm 0,6$ (60 °C) m² s⁻¹.

Falade e Abbo (2007) ao avaliarem a dependência do coeficiente de difusão efetivo com a temperatura durante a secagem e reidratação de três diferentes cultivares de tâmaras, verificaram que os coeficientes de difusão efetivo (D_{ef}) variaram de $1,8 \cdot 10^{-10}$ a $1,15 \cdot 10^{-9}$ m² s⁻¹ (vermelha *soft*), de $2,69 \cdot 10^{-10}$ a $9,51 \cdot 10^{-10}$ m² s⁻¹ (Tempo 2) e $4,27 \cdot 10^{-10}$ a $1,41 \cdot 10^{-9}$ m² s⁻¹ (Tempo 3) quando o processo de reidratação em água foi realizado no intervalo de temperatura entre 15 e 45 °C. Também observaram aumento no coeficiente de difusão efetivo com o aumento da temperatura do processo, como verificado no presente estudo.

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos empíricos/semiempíricos, Equações 6 a 16, Tabela 3, aos dados experimentais da reidratação em água das *cranberries* desidratadas estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 – Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos (Equações 6 a 16, Tabela 3) aos dados experimentais de reidratação de *cranberries* em água

Modelo	Temperatura, °C		
	10		
	R^2	P	$RMSE$
Page	0,98	0,71	0,0082
Henderson e Pabis	0,96	0,97	0,0103
Verma	0,99	0,72	0,0083
Newton	0,95	1,17	0,0127
Exponencial de Dois Termos	0,97	0,76	0,0088
Aproximação da Difusão	0,98	0,72	0,0083

Tabela 9 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos (Equações 6 a 16, Tabela 3) aos dados experimentais de reidratação de *cranberries* em água

Modelo	Temperatura, °C		
	29		
	R^2	P	$RMSE$
Page	0,99	0,38	0,0045
Henderson e Pabis	0,99	0,56	0,0062
Verma	0,98	0,76	0,0079
Newton	0,98	0,76	0,0079
Exponencial de Dois Termos	0,98	0,76	0,0079
Aproximação da Difusão	0,99	0,36	0,0047

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos (Equações 6 a 16, Tabela 3) aos dados experimentais de reidratação de *cranberries* em água

Modelo	Temperatura, °C		
	45		
	R^2	P	$RMSE$
Page	0,98	1,10	0,0111
Henderson e Pabis	0,97	1,20	0,0124
Verma	0,99	0,83	0,0087
Newton	0,97	1,17	0,0128
Exponencial de Dois Termos	0,98	1,24	0,0164
Aproximação da Difusão	0,99	0,83	0,0087

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 é possível verificar que todos os modelos apresentaram altos coeficientes de correlação, com $R^2 > 0,95$, valores de P inferiores a 10% e baixos valores de $RMSE$, o que indica bons ajustes dos modelos aos dados experimentais de reidratação.

Para a temperatura de 10 °C o modelo de Page foi o que melhor se adequou aos dados experimentais por apresentar $R^2 = 0,98$ e os menores valores de P e $RMSE$. A 29 °C os modelos da Aproximação da Difusão e de Page foram os que melhor representaram os dados experimentais, por apresentarem os maiores coeficientes de correlação ($R^2 > 0,98$) e os menores valores de P e $RMSE$. Para os experimentos realizados a 45 °C os modelos de Verma e Aproximação da Difusão apresentaram os melhores ajustes, com valores de R^2 superiores a 0,99 e de P inferiores a 1%.

Não foram encontrados na literatura estudos de reidratação de alimentos desidratados que utilizem os modelos empíricos e semi-empíricos para descrever a operação de reidratação, como realizados no presente trabalho. Porém, considerando o fenômeno de transferência de massa por difusão, considerou-se pertinente a referida modelagem. Devido a esse fato, não foi possível a comparação do ajuste dos modelos empíricos/semiempíricos aos dados de reidratação.

Entretanto, Rudy et al. (2015) utilizaram os modelos de Newton, Page, Henderson e Pabis, Logarítmico, Wang e Singh, Logístico e Dois Termos para representar a cinética de secagem das *cranberries* e, verificaram que, o modelo Logarítmico apresentou o melhor ajuste aos dados de secagem das frutas inteiras e os modelos de Wang e Singh e Page foram os que melhor se ajustaram aos dados da secagem da polpa das frutas. Ajustes satisfatórios também foram encontrados por Resende et al. (2010b) ao avaliar a cinética de secagem de clones de café. Os autores verificaram que os modelos de Verma e da Aproximação da Difusão representaram de forma satisfatória os dados experimentais, e ainda, de acordo com os autores, o modelo de Verma estima o valor da razão de umidade que, por meio de uma inversão matemática, permite obter diretamente o teor de água do produto.

Nas Tabelas 11 a 13 estão apresentados os coeficientes dos modelos que apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais da reidratação em água das *cranberries* desidratadas, Equações 6 a 16, Tabela 3, com exceção da difusividade, calculada a partir da segunda a Lei de Fick (Equação 5, Tabela 3) e apresentada na Tabela 7.

Tabela 11 - Valores dos coeficientes do modelo de Page que descrevem a reidratação em água de *cranberries* desidratadas

Temperatura, °C	Modelo	Parâmetro	
		k (min ⁻¹)	n
10	Page	0,0022 ± 0,0009	0,7588 ± 0,0762
29		0,0002 ± 6,2554 · 10 ⁻⁵	1,1833 ± 5,5305 · 10 ⁻²
45		0,0015 ± 0,0007	0,8817 ± 0,0858

Tabela 12 - Valores dos coeficientes do modelo de Verma que descrevem a reidratação em água de *cranberries* desidratadas

Temperatura, °C	Modelo	Parâmetro		
		k (min ⁻¹)	a	K_I
10	Verma	0,0009 ± 0,0015	0,9397 ± 0,5262	-0,0028 ± 0,0120
29		0,0006 ± 60,0950	0,0930 ± 3,6641 · 10 ⁵	0,0006 ± 6,1774
45		0,0009 ± 0,0001	0,9996 ± 0,0025	-0,0134 ± 0,0184

Tabela 13 - Valores dos coeficientes do modelo da Aproximação da Difusão que descrevem a reidratação em água de *cranberries* desidratadas

Temperatura, °C	Modelo	Parâmetro		
		k (min ⁻¹)	a	b
10	Aproximação da Difusão	0,0009 ± 0,0015	0,9395 ± 0,5291	-2,9536 ± 17,1774
29		0,5222 ± 6,0480 · 10 ⁵	-0,0153 ± 0,0056	0,0012 ± 1,3812 · 10 ³
45		0,0009 ± 0,0001	0,9997 ± 0,0025	-15,6557 ± 23,4031

As curvas da reidratação em água das *cranberries* estão apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10, sendo que os valores calculados foram obtidos segundo o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais: modelo de Page, Aproximação da Difusão e de Verma, as temperaturas de 10, 29 e 45 °C respectivamente.

É possível verificar nas Figuras 8 a 10 a concordância entre os valores experimentais e os preditos pelos modelos, assim como, o ajuste satisfatório dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e de Verma na descrição da reidratação em água das *cranberries* desidratadas nas diferentes temperaturas estudadas.

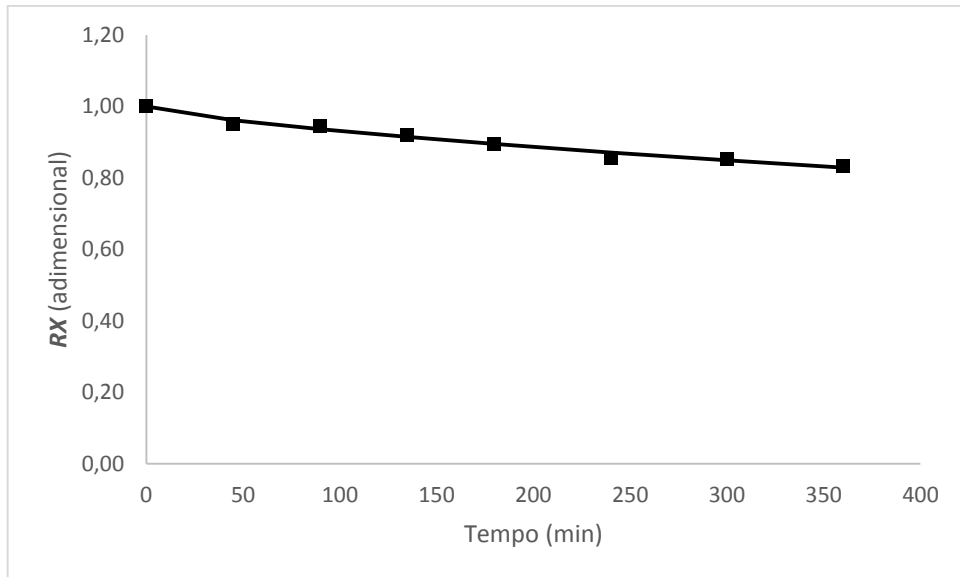


Figura 8 – Valores experimentais (■) da razão de teor de água (RX , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Page para a reidratação das *cranberries* desidratadas na temperatura de 10 °C

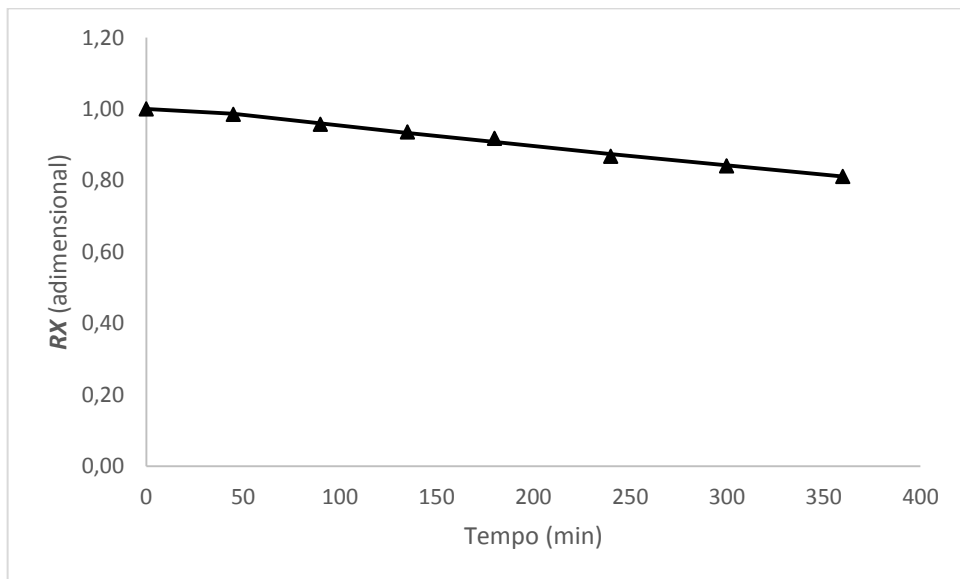


Figura 9 – Valores experimentais (▲) da razão de teor de água (RX , adimensional) e estimados pelo modelo (—) da Aproximação da Difusão para a reidratação das *cranberries* desidratadas na temperatura de 29 °C

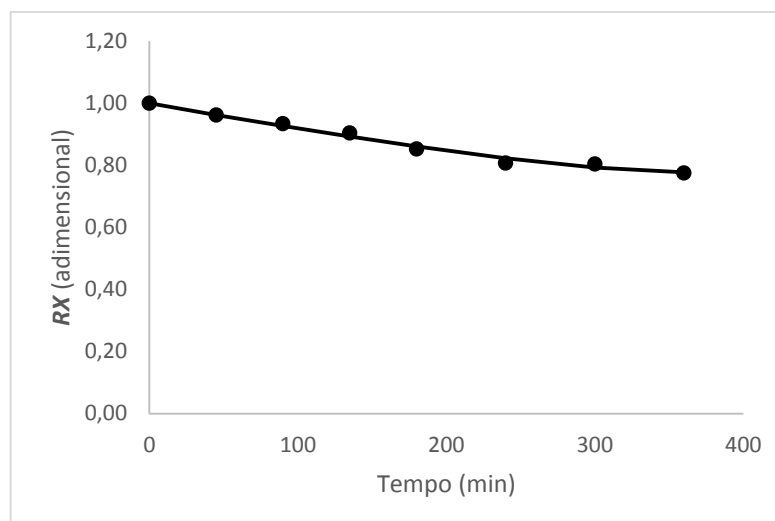


Figura 10 – Valores experimentais (●) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Verma para a reidratação das *cranberries* desidratadas na temperatura de 45 °C

A Tabela 14 apresenta o coeficiente de difusão do leite, calculado pela Equação 5, durante a reidratação das *cranberries* nas diferentes temperaturas. Ainda, estão apresentados na Tabela 14 os parâmetros estatísticos utilizados para averiguar o ajuste da Lei de Fick aos dados experimentais.

Tabela 14 - Coeficiente de difusão da água durante a reidratação de *cranberries* em diferentes temperaturas e parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste do modelo aos dados experimentais

	Temperatura	D_{ef} (m ² /s)	R^2	P	$RMSE$
Leite	10°C	$1,21 \cdot 10^{-4} \pm 8,42 \cdot 10^{-6}$	0,92	23,19	0,24
	29°C	$1,50 \cdot 10^{-4} \pm 3,39 \cdot 10^{-5}$	0,97	20,00	0,23

Verificou-se que, assim como para a água, a difusão do leite aumentou com a temperatura, apesar desse efeito não ser significativo. No geral, os coeficientes de difusão do leite foram maiores que os da água, com exceção da reidratação em água conduzida a 45 °C, fato que exige estudos mais aprofundados. No entanto, conforme verificado pela análise do teor de proteínas, ao se fazer a hidratação da fruta com leite, não há somente a difusão de água, mas de outros nutrientes para a fruta, e estes diferentes fluxos difusivos podem ter influenciado positivamente a difusão do solvente (leite).

Os parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos empíricos/semiempíricos Equações 6 a 16, Tabela 3, aos dados experimentais da reidratação em leite das *cranberries* desidratadas estão apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos (Equações 6 a 16, Tabela 3) aos dados experimentais de reidratação de *cranberries* em leite

Modelo	Temperatura, °C		
	10		
	R^2	P	$RMSE$
Page	0,97	2,72	0,0272
Henderson e Pabis	0,95	2,27	0,0215
Verma	0,99	2,61	0,0259
Newton	0,90	1,27	0,0129
Exponencial de Dois Termos	0,96	1,88	0,0195
Aproximação da Difusão	0,99	2,61	0,0259

Tabela 16 - Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o ajuste dos modelos (Equações 6 a 16, Tabela 3) aos dados experimentais de reidratação de *cranberries* em leite

Modelo	Temperatura, °C		
	29		
	R^2	P	$RMSE$
Page	0,99	0,72	0,0089
Henderson e Pabis	0,97	1,24	0,0122
Verma	0,99	0,56	0,0073
Newton	0,97	1,27	0,0128
Exponencial de Dois Termos	0,97	1,27	0,0128
Aproximação da Difusão	0,99	0,61	0,0079

De acordo com os dados das Tabelas 15 e 16 é possível verificar que todos os modelos apresentaram coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0,95, valores de P inferiores a 10% e baixos valores de $RMSE$, indicando bons ajustes aos dados experimentais.

Para a temperatura de 10 °C o modelo da Aproximação da Difusão e de Verma foram os que apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais com $R^2 = 0,99$ e baixos valores de P e $RMSE$. A 29 °C os modelos da Aproximação da Difusão e de Verma foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais, por apresentaram os maiores coeficientes de correlação ($R^2 = 0,99$) e os menores valores de P e $RMSE$. Estão apresentados nas Tabelas 17 e 18 os coeficientes dos modelos que apresentaram o melhor ajuste aos dados experimentais da reidratação em água das *cranberries* desidratadas, Equações 6 a 16, Tabela 3, com exceção da difusividade, calculada a partir da segunda a Lei de Fick (Equação 5, Tabela 3) e apresentada na Tabela 7.

Tabela 17 – Valores dos coeficientes do modelo de Verma que descrevem a reidratação em leite de *cranberries* desidratadas

Temperatura, °C	Modelo	Parâmetro		
		k (min ⁻¹)	a	K_I
10	Verma	$1,9594 \pm 0,0000$	$0,0427 \pm 0,0077$	$0,0005 \pm 3,8636 \cdot 10^{-5}$
29		$-0,0006 \pm 0,0974$	$-6,6195 \pm 9,1492 \cdot 10^3$	$-0,0004 \pm 0,0867$

Tabela 18 – Valores dos coeficientes do modelo da Aproximação da Difusão que descrevem a reidratação em leite de *cranberries* desidratadas

Temperatura, °C	Modelo	Parâmetro		
		k (min ⁻¹)	A	b
10	Aproximação	$0,2445 \pm 3,7447 \cdot 10^2$	$0,0427 \pm 0,0104$	$0,0021 \pm 3,1813$
29	da Difusão	$0,0020 \pm 0,1406$	$-12,0340 \pm 2,8401 \cdot 10^4$	$0,9411 \pm 1,3042 \cdot 10^2$

As curvas da reidratação em leite das *cranberries* estão apresentadas nas Figuras 11 e 12, sendo que os valores calculados foram obtidos segundo o modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais: o modelo de Verma.

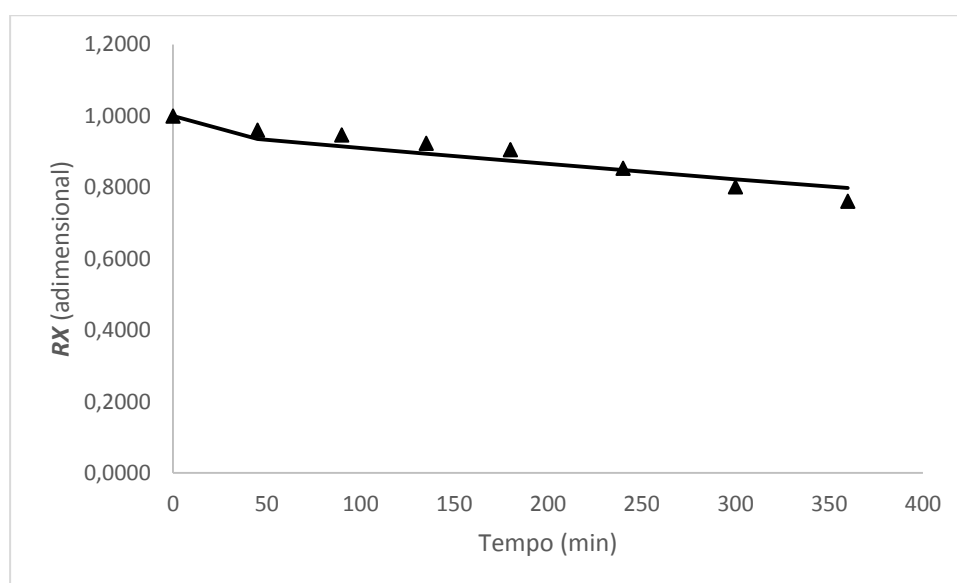


Figura 11 – Valores experimentais (▲) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Verma para a reidratação das *cranberries* desidratadas na temperatura de 10 °C

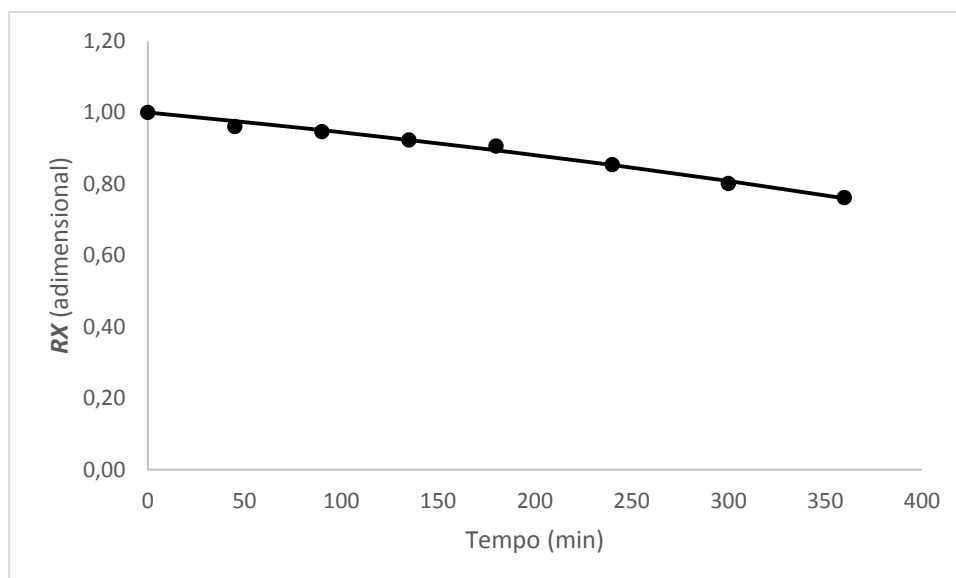


Figura 12 – Valores experimentais (●) da razão de teor de água (R_X , adimensional) e estimados pelo modelo (—) de Verma para a reidratação das *cranberries* desidratadas na temperatura de 29 °C

É possível verificar nas Figuras 11 e 12 a concordância entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo, bem como, o ajuste satisfatório do modelo de Verma na descrição da reidratação em leite das *cranberries* desidratadas para as temperaturas estudadas.

Apesar dos modelos de Page, Aproximação da Difusão e de Verma, terem se ajustado melhor aos dados experimentais, é importante ressaltar que são modelos empíricos, que podem ser utilizados para prever a umidade da amostra em determinado intervalo de tempo, porém não fornecem informações relacionadas à difusão das espécies.

5.3. TEXTURA

Estão apresentados na Tabela 19 os parâmetros médios de textura (\pm erro padrão), dureza, coesividade e resiliência avaliados para as *cranberries* desidratadas, reidratadas em água e em leite por 45 min a 29 °C.

Tabela 19 – Parâmetros de textura de *cranberries* desidratadas e reidratadas em água e leite (29 °C/45 min)

	Dureza (N)	Coesividade	Resiliência
Desidratadas	14,79 ± 6,28	0,35 ± 0,04 ^a	0,11 ± 0,02
Reidratadas em água	10,47 ± 6,76	0,40 ± 0,07 ^{a,b}	0,13 ± 0,02
Reidratadas em leite	9,72 ± 5,10	0,44 ± 0,04 ^b	0,14 ± 0,03

Médias marcadas com letras diferentes na mesma coluna diferem significativamente entre si ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 19, é possível verificar que os parâmetros de dureza, e resiliência não resultaram estatisticamente diferentes entre as amostras avaliadas, o que indica que a reidratação não ocasionou alterações perceptíveis nesses atributos instrumentais de textura das frutas desidratadas.

Ainda que não significativamente, verificou-se que a dureza das *cranberries* diminuiu cerca de 29,2% e 34, 3% quando reidratadas em água e em leite, respectivamente. Esse fato era esperado, uma vez que durante a reidratação ocorre a lixiviação de solutos da fruta para os meios de imersão.

A resiliência é um parâmetro de textura que indica a capacidade particular de um material (alimento) retornar a posição original após ter sido submetido à aplicação de uma força. Foi verificado aumento nesse parâmetro para as amostras reidratadas através do aumento dos valores de a_w , Tabela 6, o que pode estar associado aos maiores teores de água nas amostras após a reidratação.

A coesividade das *berries* reidratadas em leite resultou significativamente maior que para as demais amostras avaliadas, demonstrando que ocorreu aumento na resistência do material a forças externas que tendem a separá-lo em porções, o que, a nível sensorial, está relacionado à intensidade com que a amostra é comprimida entre os dentes antes de romper (CIVILLE; SZCZESNIAK, 1973).

Como foi verificado anteriormente na cinética de reidratação, o coeficiente de difusão da fruta reidratada em leite foi maior do que na fruta reidratada em água, desta maneira, uma vez que a coesividade está relacionada com a resistência das ligações internas que compõem o corpo do produto, tal diferença deve ser mais investigada a fim de avaliar se a difusão de compostos do leite para fruta e da fruta para o leite estão relacionadas ao aumento de coesividade.

Não foram encontrados estudos na literatura que relacionem os efeitos da reidratação e os parâmetros de textura de frutas desidratadas, entretanto, ao avaliarem os efeitos das formulações sobre a textura de geleias de maçã, Garrido, Lozano e Genovese (2015) verificaram que o efeito da concentração de sólidos solúveis sobre a coesividade foi positivo, indicando que um aumento na concentração de açúcar, aumenta a força das ligações internas da geleia (através de ligações hidrofóbicas) entre as cadeias de pectina que compõem a rede de gel. Ainda, de acordo com os autores, é esperado que a coesividade seja inversamente proporcional à taxa que o material fratura sob ação mecânica, desta maneira, quanto menor a coesividade, mais frágil é o material.

Assim, devido à quantidade de açúcares no leite, o aumento significativo verificado para o parâmetro de coesividade das frutas reidratadas nesse “solvente”, pode estar relacionado ao aumento na concentração de açúcares do meio associado ao fato de que as *cranberries* são frutas altamente ricas em pectina.

5.4. REOLOGIA DA SUSPENSÃO DE SÓLIDOS DE *CRANBERRIES*

Para verificar a existência de linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação nas diferentes concentrações de sólidos e temperaturas de análises das suspensões, foram construídos os reogramas apresentados na Figura 13.

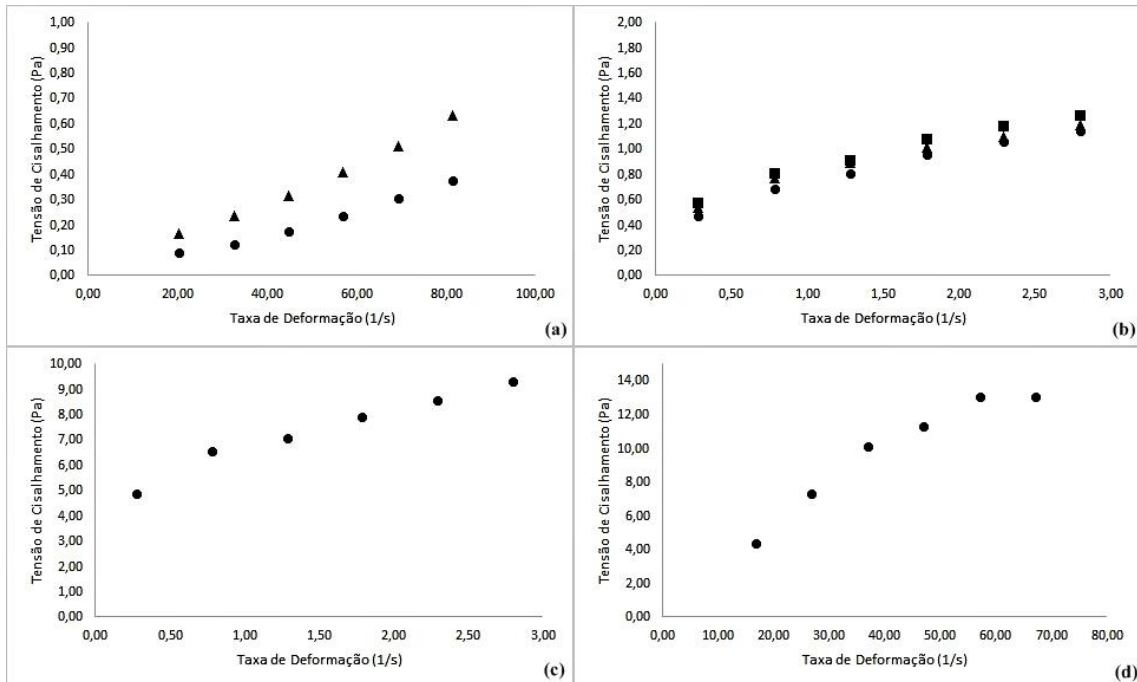


Figura 13 – (a) Tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 10% e 20 °C (●) e 60 °C (▲); (b) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 20% e 40 °C (● - ▲ - ■); (c) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 30% e 20 °C (●) e (d) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 30% e 60 °C (●)

A partir dos reogramas apresentados, é possível verificar que as amostras não apresentaram relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação nas faixas de temperatura e concentração avaliadas, portanto, o comportamento reológico dos fluidos foi classificado como não-newtoniano. Resultado semelhante também foi encontrado por Nindo et al. (2007) ao caracterizarem o comportamento reológico de purês de *blueberries* e verificarem que o fluido apresentou comportamento não-newtoniano, sendo os dados experimentais melhor ajustados ao modelo de Sisko.

O comportamento da viscosidade em função da taxa de deformação das amostras avaliadas está apresentado na Figura 14.

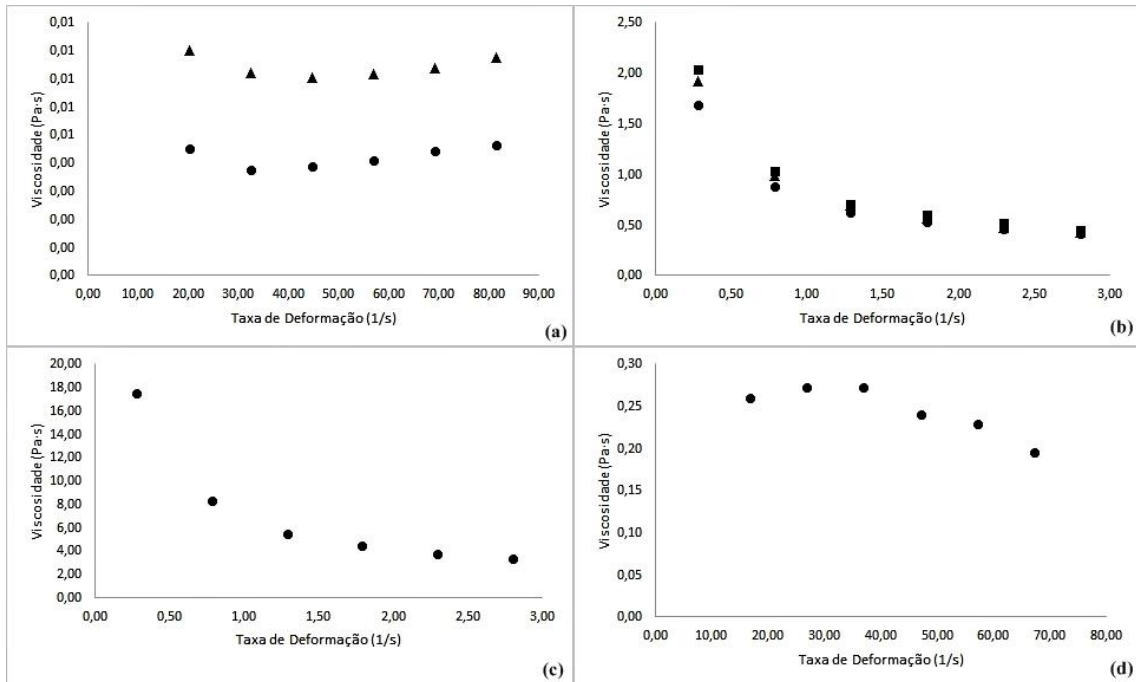


Figura 14 – (a) Viscosidade aparente versus taxa de deformação para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 10% e 20 °C (▲) e 60 °C (●); (b) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 20% e 40 °C (● -▲ - ■); (c) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 30% e 20 °C (●) e (d) para a suspensão de sólidos de *cranberries* a 30% e 60 °C (●)

Verificou-se que para as maiores concentrações de sólidos avaliadas a viscosidade aparente das amostras diminuiu com as taxas de deformação, sendo que, o experimento a 30% e 20 °C apresentou as maiores viscosidades e os experimentos a 10% e 60 °C as menores. De acordo com Alpaslan e Hayta (2002) o decréscimo na viscosidade aparente com a taxa de deformação pode ser explicado pela mudança estrutural da amostra devido a forças hidrodinâmicas geradas e ao maior alinhamento das moléculas na direção da tensão aplicada.

Por outro lado, para as suspensões a 10% de sólidos, a variação na viscosidade aparente foi bastante pequena, de 0,007 a 0,0046 Pa·s, com o aumento da taxa de deformação (Figura 14a), fato relacionado ao efeito da temperatura e concentração de sólidos sobre a viscosidade, que será discutido oportunamente no presente trabalho. Resultado semelhante foi encontrado por Nindo et al. (2007) ao caracterizarem o comportamento reológico de purês de *blueberries*, os autores verificaram que à 25 °C uma mudança de 15 para 25 °Brix na concentração dos purês resultaram em um aumento de 0,62 Pa·s na viscosidade, entretanto, ao aumentarem a temperatura do processo para 60 °C com a mesma variação no Brix, verificaram que a viscosidade aumentou em 0,29 Pa·s, quase metade do observado à menor temperatura (25 °C). Segundo os autores, seria de se esperar que em temperaturas mais elevadas a carga de bombeamento e as tensões de cisalhamento aplicadas sobre os purês resultassem reduzidas devido ao menor aumento na viscosidade.

Para a caracterização do comportamento reológico das suspensões, foram testados cinco modelos reológicos, sendo que, o modelo de Casson apresentou o melhor ajuste aos resultados em todas as faixas de concentração e temperatura avaliadas, com altos coeficientes de correlação (R^2), baixos valores de P e $RMSE$, valores ideais de B_f e menores tensões de cisalhamento iniciais (τ_0). Os parâmetros estatísticos relativos ao ajuste dos modelos reológicos de Ostwald de Waelle, Herschel-Bulkley, Casson, Bingham e Newton aos dados experimentais de reometria das suspensões de *cranberries* desidratadas em todas as faixas de concentração e temperaturas avaliadas encontram-se apresentados no APÊNDICE A.

A partir da regressão não-linear dos dados experimentais, foram obtidos os parâmetros reológicos dos modelos de Casson, apresentados na Tabela 20. Os parâmetros reológicos dos modelos de Herschel-Bulkley, Ostwald de Waelle, Bingham e Newton para as suspensões de sólidos de *cranberries* nas faixas de concentração e temperatura avaliadas encontram-se apresentados no APÊNDICE A.

Tabela 20 – Parâmetros reológicos do modelo de Casson

Temperatura, °C	Concentração (%)	Parâmetro	
		K_{0c} (Pa ^{0,5})	K_c (Pa ^{0,5} ·s ^{0,5})
20	10	-0,001 ± 0,0293	0,086 ± 0,0041
60	10	-0,04 ± 0,0358	0,07 ± 0,0050
40	20	0,520 ± 0,0154	0,335 ± 0,0124
40	20	0,589 ± 0,0197	0,305 ± 0,0159
40	20	0,598 ± 0,0176	0,320 ± 0,0142
20	30	1,873 ± 0,0470	0,702 ± 0,0379
60	30	-0,677 ± 0,3026	0,382 ± 0,0467

Verificou-se que algumas amostras apresentaram tensões de cisalhamento (K_{0c}) negativas e as demais, tensões de cisalhamento muito baixas, sendo o maior valor encontrado (1,873 Pa^{0,5} ± 0,0470) para o experimento realizado a 30% e 20 °C e o menor valor (-0,001 Pa^{0,5} ± 0,0293) para o experimento realizado a 10% e 20. Isso indica que as suspensões de *cranberry* desidratada não necessitam, ou ainda, necessitam de tensões de cisalhamento iniciais desprezíveis para iniciar o escoamento nesta concentração e temperatura.

Este comportamento também foi verificado por Carneiro et al. (2013) ao avaliar o comportamento reológico de néctares de uva (tradicionais e *lights*) comerciais, na temperatura de 25 °C, sendo que os autores encontraram tensões de cisalhamento iniciais negativas e o

maior valor para a tensão de cisalhamento inicial foi de $(0,112 \text{ Pa} \pm 0,0723)$ para a amostra de néctar de uva tradicional.

Para os experimentos realizados a 10% foi possível verificar que houve uma ligeira diminuição no valor de K_c com o aumento da temperatura. Nos experimentos realizados a 20% observou-se que o valor de K_c ficou na faixa de $0,30 - 0,33 \text{ Pa}^{0,5} \cdot \text{s}^{0,5}$, indicando boa repetibilidade dos experimentos. Para os experimentos realizados nas concentrações de suspensão de 30% foi possível notar aumento significativo no valor de K_c para o experimento realizado a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, entretanto, uma diminuição significativa ocorreu quando a temperatura aumentou para $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.5. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE TRABALHO E DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO SOBRE A TENSÃO DE CISALHAMENTO INICIAL DE CASSON (K_{0c}) E SOBRE A VISCOSIDADE PLÁSTICA DE CASSON (K_c)

A matriz dos ensaios realizados no planejamento fatorial completo 2^2 com os valores reais e codificados das variáveis estudadas, e as respostas de tensão de cisalhamento inicial (K_{0c}) e viscosidade plástica de Casson (K_c) está apresentada nas Tabelas 21 e 22

O menor valor observado entre as respostas do planejamento para a tensão de cisalhamento inicial foi de $-0,001 \text{ Pa}^{0,5}$, no ensaio 1, e a viscosidade plástica foi de $0,070 \text{ Pa}^{0,5} \cdot \text{s}^{0,5}$ no ensaio 2. O maior valor dentre as respostas foi de $K_{0c} = 1,873 \text{ Pa}^{0,5}$ no ensaio 3 e de $K_c = 0,382 \text{ Pa}^{0,5} \cdot \text{s}^{0,5}$ no ensaio 4. De acordo com Ferreira, Guimarães e Maia (2008) os valores negativos para tensão de cisalhamento, não denotam significado físico e, para Oliveira, Souza e Monteiro (2008), estas são os resultados do ajuste do próprio modelo, influenciado por erros experimentais. Por este motivo, os valores negativos encontrados para as tensões de cisalhamento foram adotados como 0 durante a realização da análise estatística, Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Matriz do delineamento experimental com níveis reais e codificados das variáveis independentes, respostas de K_{0C} (Pa^{0,5}), valores preditos pelo modelo e desvios relativos, para as suspensões de *cranberries*

Ensaio	x_1^a	x_2^b	K_{0c} (Pa ^{0,5}) ^c	K_{0c} Predito ^d	Desvio Relativo (%) ^g
1	-1 (20)	-1 (10)	0	0,043	NC*
2	+1 (60)	-1 (10)	0	0,043	NC*
3	-1 (20)	1 (30)	1,873 ± 0,0470	1,916	-2,305
4	+1 (60)	1 (30)	0	0,043	NC*
5	0 (40)	0 (20)	0,520 ± 0,0154	0,511	1,648
6	0 (40)	0 (20)	0,589 ± 0,0197	0,511	13,170
7	0 (40)	0 (20)	0,598 ± 0,0176	0,511	14,477

Tabela 22 – Matriz do delineamento experimental com níveis reais e codificados das variáveis independentes, respostas de K_c (Pa^{0,5}·s^{0,5}), valores preditos pelo modelo e desvios relativos, para as suspensões de *cranberries*

Ensaio	x_1^a	x_2^b	K_c (Pa ^{0,5} ·s ^{0,5}) ^e	K_c Predito ^f	Desvio Relativo (%) ^g
1	-1 (20)	-1 (10)	0,086 ± 0,0041	0,090	-4,983
2	+1 (60)	-1 (10)	0,070 ± 0,0050	0,074	-6,122
3	-1 (20)	1 (30)	0,702 ± 0,0379	0,706	-0,611
4	+1 (60)	1 (30)	0,382 ± 0,0467	0,386	-1,122
5	0 (40)	0 (20)	0,335 ± 0,0124	0,314	6,183
6	0 (40)	0 (20)	0,305 ± 0,0159	0,314	-3,044
7	0 (40)	0 (20)	0,320 ± 0,0142	0,314	1,786

^aTemperatura (°C); ^bConcentração da suspensão de sólidos (%); ^cRaiz quadrada da tensão de cisalhamento inicial de Casson (valores experimentais) ± erro padrão;

^dRaiz quadrada da tensão de cisalhamento de Casson predita pelo modelo; ^eRaiz quadrada da viscosidade plástica de Casson ± erro padrão; ^fRaiz quadrada da viscosidade plástica de Casson predita pelo modelo;

^gDesvio relativo = $\left[\frac{(Y - \hat{Y})}{Y} \right] \cdot 100$, em que: Y é a resposta experimental e \hat{Y} é a resposta prevista pelo modelo; *NC – não calculado.

Com os dados da Tabela 21 foram calculados os efeitos das duas variáveis estudadas sobre a tensão de cisalhamento inicial (K_{0C}) e os resultados encontram-se apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Efeitos das variáveis independentes temperatura e concentração de sólidos (*cranberries* desidratadas) em suspensão sobre a resposta K_{0c}

	Efeitos	Erro Padrão	t (3)	p - valor
Média	0,51	0,0317	16,16	0,0005*
Temperatura (°C)	-0,94	0,0838	-11,18	0,0015*
Concentração (%)	0,94	0,0838	11,18	0,0015*
Temperatura x Concentração	-0,94	0,0838	-11,18	0,0015*

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

É possível verificar a partir dos dados da Tabela 23 que todas as variáveis apresentaram efeitos estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$) sobre a resposta estudada. A temperatura exerceu efeito negativo sobre a resposta tensão de cisalhamento inicial (K_{0c}), indicando que a uma taxa de deformação fixa, a tensão de cisalhamento inicial diminuiu à medida que a temperatura aumentou. Logo, como é observado nos ensaios 3 e 4, em que a concentração da suspensão é de 30%, o menor valor da tensão de cisalhamento foi alcançado na maior temperatura. Nos ensaios 1 e 2, em que a concentração de suspensão foi de 10% de sólidos, a temperatura não exerceu mudanças significativas na resposta, indicando que, possivelmente, a partir de determinada concentração de sólidos em suspensão, as mudanças na temperatura resultem em redução da tensão de cisalhamento inicial, Tabela 21. Resultados semelhantes foram encontrados por Ferreira, Guimarães e Maia (2008), Nindo et al. (2007) e Kechinski et al. (2001) ao avaliarem as propriedades reológicas da polpa de cupuaçu, purê de *blueberries* e purê de *blueberries* adicionado de goma xantana e frutose, respectivamente.

A concentração da suspensão de sólidos exerceu efeito positivo sobre a resposta tensão de cisalhamento inicial, indicando que a tensão de cisalhamento inicial necessária para iniciar o escoamento aumenta com o aumento da concentração. Resultado semelhante também foi encontrado por Nindo et al. (2007) ao caracterizar o comportamento reológico de purê de *blueberries*, utilizando uma equação exponencial para explicar a relação entre a tensão de cisalhamento inicial e a concentração de sólidos.

Também é possível verificar que a interação entre as variáveis temperatura e concentração de sólidos exerceu efeito negativo sobre a tensão de cisalhamento inicial. Tal fato é observado entre os experimentos 3 e 5, Tabela 21, em que a redução de 33% na concentração e o aumento de 20 °C na temperatura ocasionaram diminuição de 72,24% na tensão de cisalhamento inicial.

Com a análise estatística dos resultados foram obtidos os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Coeficientes de regressão para a resposta K_{OC} do planejamento experimental

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t (3)	p - valor
Média	0,51	0,0317	16,16	0,0005*
x_1	-0,47	0,0419	-11,18	0,0015*
x_2	0,47	0,0419	11,18	0,0015*
x_1x_2	-0,47	0,0419	-11,18	0,0015*

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

Considerando os parâmetros estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$), o efeito das variáveis independentes do planejamento proposto sobre a resposta tensão de cisalhamento inicial foi descrito por um modelo de primeira ordem, apresentado na Equação 32.

$$K_{OC} = 0,41 - 0,47x_1 + 0,47x_2 - 0,47x_1x_2 \quad (32)$$

Em que: K_{OC} é a tensão de cisalhamento inicial de Casson, em Pa^{0,5}; x_1 é a temperatura, em °C; x_2 é a concentração, em %.

A análise de variância do modelo (ANOVA), apresentada na Tabela 25, mostrou que o modelo ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais, uma vez que o $F_{calculado}$ para a regressão foi bastante significativo ($p = 0,0012$), sendo 13,47 vezes maior que o $F_{tabelado}$, e o percentual de variação explicada pelo modelo foi ótimo ($R^2 \approx 99,21\%$). Assim, foi possível construir as superfícies de resposta e de contorno com os dados experimentais, as quais são representadas na Figura 15. Ainda, os desvios relativos apresentados na Tabela 21 foram inferiores a 10%, exceto para os ensaios 6 e 7, comprovando o ajuste adequado dos modelos aos dados experimentais.

Tabela 25 - ANOVA do modelo linear para predição da resposta K_{OC} do planejamento experimental proposto

Fonte de Variação	SQ^a	GL^b	QM^c	$F_{calculado}$	p-valor
Regressão	2,63	3	0,8770	125,03	0,0012
Resíduos	0,02	3	0,0070		
Total	2,65				

% variação explicada $R^2 = 99,21$ $F_{3;3;0,07} = 9,28$

^a = soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios

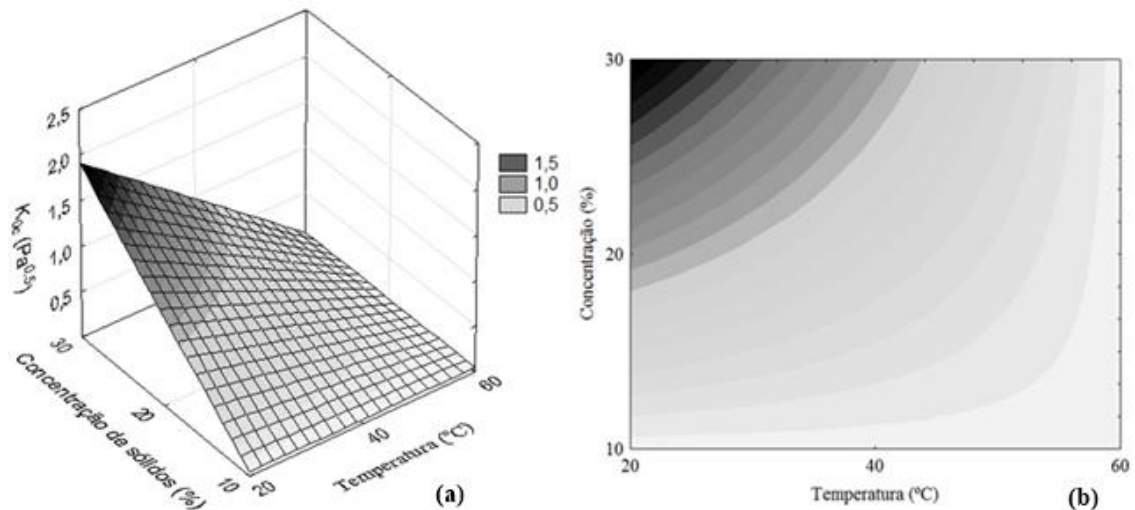


Figura 15 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a resposta K_{OC} ($\text{Pa}^{0.5}$) em função da concentração de sólidos e temperatura da suspensão de sólidos de *cranberries* desidratadas

Considerando os resultados encontrados para a tensão de cisalhamento inicial, é possível verificar que o aumento da concentração da suspensão acima de 20%, resulta em maior tensão de cisalhamento inicial, Tabela 21. Tal fato é influenciado pela temperatura, cujo aumento resulta em diminuição significativa da resposta quando a concentração é de 30%. Desta maneira, verificou-se que o valor máximo de K_{OC} é obtido a baixas temperaturas e concentração de sólidos de *cranberries* em torno de 30%, Figura 15.

Visto que a maioria dos processos e operações industriais são realizados a temperaturas mais elevadas, os resultados são de grande importância, uma vez que oferecem vantagens práticas, tais como na seleção de bombas, por fornecerem o torque inicial necessário para induzir o escoamento das suspensões, principalmente aquelas com altas concentrações de sólidos (NINDO et al., 2007).

Kechinski et al. (2011) encontram resultados semelhantes para purês de *blueberries* enriquecidos com goma xantana e frutose, verificando que, os máximos valores para a tensão de cisalhamento inicial, são alcançados a baixas temperaturas e concentração de gomas xantana em torno de 2,5%.

Ao verificar a influência da temperatura e da concentração de sólidos sobre a tensão de cisalhamento inicial de purês de *blueberries*, Nindo et al. (2007) observaram que, para as faixas de temperaturas estudadas, os purês a 25 $^{\circ}\text{Brix}$ apresentaram valores de tensão de cisalhamento de 18 a 20 vezes maior do que para os purês a 10 $^{\circ}\text{Brix}$. Ainda, ao variar a temperatura de 25 para 60 $^{\circ}\text{C}$, a tensão de cisalhamento diminuiu em cerca de 50%, como verificado no presente estudo, ao variar a temperatura de 20 para 60 $^{\circ}\text{C}$ a 30% de concentração de sólidos.

Analogamente, analisando-se os resultados da Tabela 22 foi possível calcular os efeitos das duas variáveis independentes estudadas sobre a viscosidade plástica de Casson (K_C). Os resultados encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Efeitos das variáveis temperatura e concentração de sólidos (*cranberries* desidratadas) em suspensão sobre a resposta K_C

	Efeitos	Erro Padrão	t (3)	p - valor
Média	0,31	0,0054	57,77	< 0,0000*
Temperatura (°C)	-0,17	0,0144	-11,67	0,0014*
Concentração (%)	0,46	0,0144	32,24	0,0001*
Temperatura x Concentração	-0,15	0,0144	-10,56	0,0018*

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

É possível verificar na Tabela 26 que todas as variáveis apresentaram efeitos estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$) sobre a resposta estudada. A temperatura exerceu efeito negativo sobre a resposta, indicando que a viscosidade plástica de Casson diminuiu à medida que a temperatura aumentou. Tal fato é evidenciado nos ensaios realizados a 10 e 30% de concentração de sólidos, em que, o aumento de 40 °C na temperatura do processo ocasiona uma redução significativa na viscosidade plástica das suspensões. Considerando que nem toda pectina presente na fruta seja degradada durante a secagem e que ainda haja a degradação a altas temperaturas de análise, de acordo com Diaz, Anthon e Barrett (2007) o efeito negativo da temperatura sobre a viscosidade pode estar relacionado com a degradação térmica da pectina da fruta.

A concentração exerceu efeito positivo sobre a resposta, como esperado, uma vez que, aumentando a concentração de sólidos em suspensão são encontrados os maiores valores de viscosidade, sendo este aspecto evidenciado nos experimentos em que foram utilizadas concentrações mais elevadas. Os maiores valores para a viscosidade foram observados para a concentração de 30% de sólidos.

Entretanto, a interação entre as variáveis independentes (temperatura e concentração) afetaram negativamente a resposta viscosidade plástica de Casson. Assim, mudanças na concentração e na temperatura das suspensões de *cranberries* resultam na diminuição dos valores de viscosidade com aumento da taxa de deformação.

Com a análise estatística dos dados experimentais foram encontrados os coeficientes de regressão para a resposta viscosidade plástica de Casson, os quais são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Coeficientes de regressão para a resposta K_C do planejamento experimental

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t (3)	p - valor
Média	0,31	0,0054	57,77	$\leq 0,0000^*$
x_1	-0,08	0,0072	-11,67	0,0014*
x_2	0,23	0,0072	32,24	0,0001*
x_1x_2	-0,08	0,0072	-10,56	0,0018*

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

Considerando os parâmetros estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$) foi possível determinar o modelo de primeira ordem, Equação 33, que representa o efeito das variáveis independentes (concentração e temperatura das suspensões de sólidos de *cranberries* desidratadas) sobre a resposta viscosidade plástica de Casson (K_C).

$$K_C = -0,31 - 0,08x_1 + 0,23x_2 - 0,08x_1x_2 \quad (33)$$

Em que: K_C é a viscosidade plástica de Casson, em $\text{Pa}^{0,5} \cdot \text{s}^{0,5}$; x_1 é a temperatura, em $^\circ\text{C}$; x_2 é a concentração, em %.

A análise de variância (ANOVA) do modelo, apresentada na Tabela 28, mostrou que o modelo representou adequadamente os dados experimentais, já que o $F_{\text{calculado}}$ para a regressão foi significativo ($p = 0,0002$), sendo 46,23 vezes maior que o F_{tabelado} , e o percentual de variação explicada pelo modelo foi ótimo $R^2 \approx 99,77\%$. Logo, foi possível construir as superfícies de resposta e de contorno com os dados experimentais, as quais são apresentadas na Figura 16. Ainda, os desvios relativos apresentados nas Tabelas 21 e 22 foram inferiores a 10%, comprovando o ajuste adequado dos modelos aos dados experimentais.

Tabela 28 – ANOVA do modelo linear para predição de K_C (Pa) do planejamento experimental proposto

Fonte de Variação	SQ^a	GL^b	QM^c	$F_{\text{calculado}}$	p-valor
Regressão	0,27	3	0,0889	429,05	0,0002
Resíduos	0,000621	3	0,0002		
Total	0,27				

% variação explicada $R^2 = 99,77$ $F_{3;3;0,07} = 9,28$

^a = soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios

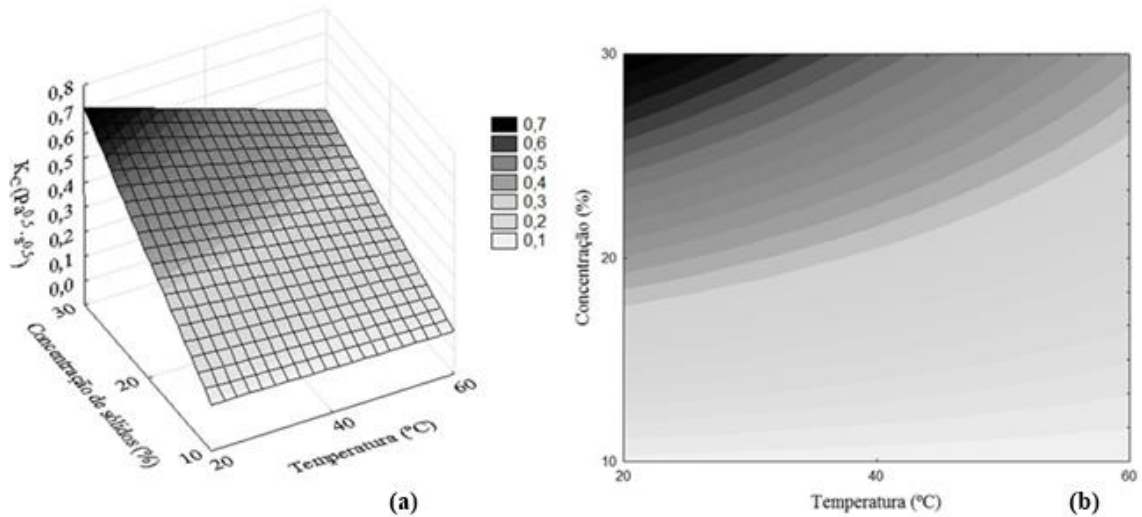


Figura 16 – Superfície de resposta (a) e curva de contorno (b) para a resposta K_C (Pa^{0.5}·s^{0.5}) em função da concentração de sólidos e temperatura da suspensão de *cranberries*

A partir dos resultados, verificou-se que a concentração de sólidos foi a variável chave na definição de K_C e conseqüentemente da viscosidade. Ainda, temperaturas mais elevadas acarretaram diminuição no valor de K_C , cujo maior valor foi encontrado para concentrações acima de 20% e a baixas temperaturas, Figura 16. Resultado semelhante foi verificado por Kechinski et al. (2011) ao avaliar o comportamento reológico de purês de *blueberries* enriquecidos com goma xantana e frutose, que verificaram que a variável concentração dos purês teve maior influência na determinação da viscosidade plástica de Casson do que a variável temperatura e que, a temperatura exerceu efeito significativo apenas a altas concentrações de gomas.

Segundo Nindo et al. (2007) que avaliou a influência da temperatura sobre a viscosidade de purês de *blueberries*, é de se esperar que a carga de bombeamento e tensões de cisalhamento impostas sobre purês sejam reduzidas a maiores temperaturas de processo (60 °C), e que as interações de outros fatores, tais como, mudanças na proximidade de partícula para partícula, temperatura, Brix, etc. não devem ser desprezadas.

A diminuição na viscosidade das suspensões de *cranberries* pode melhorar o comportamento de escoamento do produto durante o processamento e, melhorar a preferência do consumidor deste produto (CHEN; MARTYNENKO, 2016).

6. CONCLUSÃO

Conclui-se que a lei de Fick representou de modo satisfatório os dados de reidratação das *cranberries*, sendo os valores dos coeficientes de difusão efetivos de $8,33 \cdot 10^{-5}$ (10°C), $9,35 \cdot 10^{-5}$ (29 °C) e $1,25 \cdot 10^{-4}$ cm² s⁻¹ (45 °C) durante a reidratação em água e de $1,21 \cdot 10^{-4}$ (10°C) e $1,5 \cdot 10^{-4}$ (29 °C) cm² s⁻¹ durante a reidratação em leite. Esses dados são fundamentais para o projeto/construção de equipamentos, otimização e implantação de processos.

Os modelos empíricos/semiempíricos utilizados usualmente para descrever a secagem de alimentos, apresentaram bons ajustes aos dados de reidratação das *cranberries* desidratadas. Esse dado é de interesse, uma vez que o cálculo do tempo de operação pode ser realizado com base nos referidos modelos.

A coesividade das *berries* reidratadas em leite foi significativamente maior que das frutas reidratadas em água, fato relacionado possivelmente ao ganho de sólidos pela fruta durante sua reidratação.

A reometria das suspensões de *cranberries* desidratadas nas faixas de concentração e temperatura avaliadas mostrou que os fluidos apresentaram comportamento não newtoniano, satisfatoriamente ajustados ao modelo de Casson.

O planejamento experimental realizado possibilitou a obtenção de modelos para o cálculo da tensão de cisalhamento inicial e da viscosidade de Casson em função da temperatura de análise e da concentração de sólidos de *cranberry* desidratada em suspensão, sendo verificado que, as maiores tensões de cisalhamento iniciais foram alcançadas em baixas temperaturas de processo e maiores concentrações sólidos e, as maiores viscosidades foram alcançadas para concentrações de sólidos acima de 20% e a baixas temperaturas, sendo a concentração a variável que apresentou a maior influência nesse parâmetro.

REFERÊNCIAS

AGNIESZKA, C.; ANDRZEJ, L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 2, p. 267-274, 2010.

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

ALPASLAN, M.; HAYTA, M. Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses)/tahin (sesame paste) blends. **Journal of Food Engineering**, v. 54, n. 1, p. 89-93, 2002.

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

BATTAGLINI, P. M. N.; RAZUK, C. P. Contribuição ao estudo sobre agitação de fluidos de alta viscosidade e não-newtonianos. In: III SIMPÓSIO BRASIL-JAPÃO 2010, Campo Grande, 2010. **Simpósio**. Campo Grande: Neusa Maria Pavão Battaglini, 2010. p.1-10.

BETTS, G. D.; WALKER, S. J.; STEELE, R. Verification and validation of food spoilage models. **Understanding and measuring the shelf-life of food**, p. 184-217, 2004.

BOROWSKA, J. E.; MAZUR, B.; KOPCIUCH, G. R.; BUSZEWSKI, B. Polyphenol, Anthocyanin and Resveratrol Mass Fractions and Antioxidant Properties of *Cranberry* Cultivars. **Food Technology & Biotechnology**, v. 47, n. 1, 2009.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C. A. Comportamento reológico de misturas de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura utilizando modelo de casson. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 2, p. 183-189, 2005.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Springer Science & Business Media, 1992.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. Pearson Prentice Hall, 2008.

CARDELLO, V. A. The role of the human senses in food acceptance. In: **Food choice, acceptance and consumption**. Springer US, 1996. p. 1-82.

CARNEIRO, A.; SILVA, L.; ABREU, D.; COSTA, E.; SOARES, D.; BARBOSA, L. C.; FIGUEIREDO, R. Avaliação da rotulagem, caracterização química, físico-química e reológica de néctares de uva comercializados na cidade de Fortaleza–CE. Evaluation of labels, chemical, physical and chemical rheology of grape nectar sold in the city of.. **Alimentos e Nutrição**, v. 24, n. 2, 2013.

CHANVRIER, H.; UTHAYAKUMARAN, S.; LILLFORD, P. Rheological properties of wheat flour processed at low levels of hydration: Influence of starch and gluten. **Journal of Cereal Science**, v. 45, n. 3, p. 263-274, 2007.

CHEN, Y.; MARTYNENKO, A. Effect of hydrothermodynamic (HTD) processing on physical and chemical qualities of American *cranberry* puree using response surface methodology (RSM). **LWT-Food Science and Technology**, v. 70, p. 322-332, 2016.

CIVILLE, G. V.; SZCZESNIAK, A. S. Guidelines to training a texture profile panel. **Journal of Texture Studies**, v. 4, n. 2, p. 204-223, 1973.

CLEMENTE, G.; BON, J.; SANJUÁN, N.; MULET, A. Drying modelling of defrosted pork meat unddfdfer forced convection conditions. **Meat Science**, v. 88, n. 3, p. 374-378, 2011.

CONTADOR, L.; SHINYA, P.; INFANTE, R. Texture phenotyping in fresh fleshy fruit. **Scientia Horticulturae**, v. 193, p. 40-46, 2015.

CRANBERRY a pequena notável. **Aditivos e Ingredientes**, São Paulo, 2013. p.52.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion: 2d Ed.** Clarendon Press, 1975.

DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N. Propriedades antioxidantes de compostos fenólicos. **Visão Acadêmica**, v. 5, n. 1, 2004.

DA SILVA, L. M. R.; MAIA, G. A.; DE SOUSA, P. H. M.; AFONSO, M. R. A.; DA COSTA GONZAGA, M. L.; DO CARMO, J. S. Efeito da temperatura no comportamento reológico de néctares mistos de caju, manga e acerola. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 11, n. Supl 1, p. S85-S93, 2013.

DA SILVA, F. C.; GUIMARÃES, D. H. P.; GASPARETTO, C. A. Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 1, p. 121-126, 2005.

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.

DIAZ, J. V.; ANTHON, G. E.; BARRETT, D. M. Nonenzymatic degradation of citrus pectin and pectate during prolonged heating: effects of pH, temperature, and degree of methyl esterification. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 13, p. 5131-5136, 2007.

DOROFEJEVA, K.; RAKCEJEVA, T.; GALOBURDA, R.; DUKALSKA, L.; KVIESIS, J. Vitamin C content in Latvian *cranberries* dried in convective and microwave vacuum driers. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 433-440, 2011.

DUARTE-MOLINA, F.; GÓMEZ, L. P.; CASTRO, A. M.; ALZAMORA, M. S. Storage quality of strawberry fruit treated by pulsed light: Fungal decay, water loss and mechanical properties. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 34, p. 267-274, 2016.

FALADE, O. K.; ABBO, S. E. 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, G. M.; GUIMARÃES, M. J. O. C.; MAIA, M. C. A. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da polpa de cupuaçu (*T. grandiflorum Schum*) integral. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 2, p. 385-389, 2008.

FELLOWS, P. J. **Food processing technology: principles and practice**. Elsevier, 2009.

FRANCO, L. *Cranberry terapêutica*. *Revista Globo Rural*, Dezembro de 2010. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI152854-18281,00-CRANBERRY+TERAPEUTICA.html#>>. Acesso em 22 de Agosto de 2016.

GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; MELIS, R.; MULET, A. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modelling. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 4, p. 346-353, 2006.

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.

GOMIDE, R. **Fluidos na Indústria**. R. Gomide, 1993.

GOYALDE, N. A.; MELO, E. D. C.; ROCHA, R. P.; GONELI, A. L. D.; ARAÚJO, F. L. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 11, p. 117-121, 2009.

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

HEBBAR, H. U.; RASTOGI, N. K. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 1, p. 1-5, 2001.

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

HUGO, V. Vai um *oxicoco* seco aí? Dezembro de 2009. Disponível em: <<http://pratofundo.com/2091/vai-um-oxicoco-seco-ai>>. Acesso em: 30 out. 2016.

IBARZ, A.; BARBOSA-CANÓVAS, V. G. **Unit Operations in Food Engineering**. United States: Florida, 2003.

INFANTE, R.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, P.; PREDIERI, S. Quality oriented fruit breeding: Peach [*Prunus persica* (L.) Batsch]. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v. 6, n. 2, p. 342, 2008.

INFANTE, R.; MARTÍNEZ-GÓMEZ, P.; PREDIERI, S. Breeding for fruit quality in *Prunus*. **Breeding for Fruit Quality**, p. 201-229, 2011.

INSTITUTE CRANBERRY, **About cranberries**. Disponível em: <http://www.cranberryinstitute.org/about_cran/_aboutcranberries.html>. Acesso em: 03 nov. 2015.

INSTITUTE *CRANBERRY*, **Crop statistics**. Disponível em: <http://www.cranberryinstitute.org/about_cran/Cropstatistics_about.html>. Acesso em: 03 nov. 2015.

INSTITUTE *CRANBERRY*, **How dried cranberries are made?** Disponível em: <http://www.cranberryinstitute.org/about_cran/HowMadeWEB.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2015.

JRIDI, MOURAD; SOUISSE, NABIL; SALEM, BEN SALEM MARWA; AYADI, M. A; NASRI, MONCEF; AZABOU, SAMIA. Tunisian date (*Phoenix dactylifera L.*) by-products: characterization and potential effects on sensory, textural and antioxidant properties of dairy desserts. **Food Chemistry**, v. 188, p. 8-15, 2015.

KECHINSKI, P. C.; SCHUMACHER, B. A.; MARCZAK, D. F. L.; TESSARO, C. I.; CARDOZO, S. M. NILO. Rheological behavior of *blueberry* (*Vaccinium ashei*) purees containing xanthan gum and fructose as ingredients. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 3, p. 299-306, 2011.

KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n. 1, p. 1-7, 2003.

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

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

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

MAGALHÃES, J. Guia do *cranberry* – Saiba tudo sobre o *cranberry*. Disponível em: <<http://www.portalparamulher.com/cranberry-guia-completo>>. Acesso em: 30 out. 2016.

MALDONADO, S.; ARNAU, E.; BERTUZZI, M. A. Effect of temperature and pretreatment on water diffusion during rehydration of dehydrated mangoes. **Journal of Food Engineering**, v. 96, n. 3, p. 333-341, 2010.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO E. D. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007.

MIKULIC-PETKOVSEK, M.; SCHMITZER, V.; SLATNAR, A.; STAMPAR, F.; VEBERIC, R. Composition of sugars, organic acids, and total phenolics in 25 wild or cultivated *berry* species. **Journal of Food Science**, v. 77, n. 10, p. C1064-C1070, 2012.

MOTHÉ, MICHELLE GONÇALVES. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. 2009. NÚMERO DE FOLHAS: XXX f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Escola de Química. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

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.

NINDO, C. I.; TANG, J.; POWERS, J. R.; SINGH, P. Viscosity of *blueberry* and *raspberry* juices for processing applications. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 3, p. 343-350, 2005.

OLIVEIRA, K. H.; SOUZA, J. A. R.; MONTEIRO, A. R. Caracterização reológica de sorvetes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 592-598, 2008.

OSZMIAŃSKI, J., KOLNIAK-OSTEK, J., LACHOWICZ, S., GORZELANY, J., MATŁOK, N. Effect of dried powder preparation process on polyphenolic content and antioxidant capacity of *cranberry* (*Vaccinium macrocarpon* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 658-665, 2015.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.

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

RAO, M. A. **Rheology of fluid and semisolid foods**. Gaithersburg. Maryland: Aspen, 1999.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010a.

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

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e otimização de processos: Uma estratégia sequencial de planejamentos**. Casa do Pão Editora. 2005.

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

RUDY, S.; DZIKI, D.; KRZYKOWSKI, A.; GAWLIK-DZIKI, U.; POLAK, R.; RÓZYLO, R.; KULIG, R. Influence of pre-treatments and freeze-drying temperature on the process kinetics and selected physico-chemical properties of *cranberries* (*Vaccinium macrocarpon Ait.*). **LWT-Food Science and Technology**, v. 63, n. 1, p. 497-503, 2015.

SAHIN, S.; SUMNU, S. G. Water activity and sorption properties of foods. In: **Physical properties of foods**. Springer New York, 2006. p. 193-228.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Artliber Ed., 2006.

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

SILVEIRA, N. G. A.; VARGAS, P. N.; ROSA, C. S. Teor de polifenóis e composição química do mirtilo do grupo *Highbush*. **Alimentos e Nutrição**, v.18, n.4, p. 365-370, 2007.

ŠIMUNEK, M.; JAMBRAK, R. A.; DOBROVIÉ, S.; HERCEG, Z.; VUKUŠIĆ, 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.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. Gulf Professional Publishing, 2001.

SZCZESNIAK, A. S. Objective Measurements of Food Texturea. **Journal of Food Science**, v. 28, n. 4, p. 410-420, 1963.

SZCZESNIAK, A. S. Texture is a sensory property. **Food Quality and Preference**, v. 13, n. 4, p. 215-225, 2002.

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

STEFFE, J. F.; DAUBERT, C. R. **Bioprocessing pipelines: rheology and analysis**. Freeman Press, 2006.

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

TONELI, J. T. C. L.; MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Estudo da reologia de polissacarídeos utilizados na indústria de alimentos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 2, p. 181-204, 2005.

USDA, **Fruit and Tree Nuts Outlook**. Economic Research Service. United States Department of Agriculture. September, 2015. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/media/1910543/fts-360.pdf>>. Acesso em 22 de Agosto de 2016.

VATTEM, D. A.; GHAEDIAN, R.; SHETTY, K. “Enhancing health benefits of berries through phenolic antioxidant enrichment: focus on *cranberry*”. **Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition**, v. 14, n. 2, p. 120, 2005.

VEGA-GÁLVEZ, A. L. M. S.; LEMUS-MONDACA, R.; BILBÃO-SAINZ, C.; FITO, P.; ANDRÉS, A. Effect of air drying temperature on the quality of rehydrated dried red bell pepper (var. *Lamuyo*). **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 1, p. 42-50, 2008.

VIEIRA, A. P.; NICOLETI, J. F.; TELIS, V. R. N. Freeze drying of pineapple slices: evaluation of drying kinetics and product quality. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n. 1, p. 50-58, 2012.

WANG, S. Y.; STRETCH, A. W. Antioxidant capacity in *cranberry* is influenced by cultivar and storage temperature. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 2, p. 969-974, 2001.

YAN, X.; MURPHY, B. T.; HAMMOND, G. B.; VINSON, J. A.; NETO, C. C. Antioxidant activities and antitumor screening of extracts from *cranberry* fruit (*Vaccinium*

macrocarpon). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 21, p. 5844-5849, 2002.

ZHANG, Z.; LIU, X.; ZHANG, X.; LIU, J.; HAO, Y.; YANG, X.; WANG, Y. Comparative evaluation of the antioxidant effects of the natural vitamin C analog 2-O- β -D-glucopyranosyl-L-ascorbic acid isolated from *Goji berry* fruit. **Archives of Pharmacal Research**, v. 34, n. 5, p. 801-810, 2011.

ZHANG, Z.; ZHU, X.; XIE, Z.; ZHAO, Z.; DUBÉ, C.; ROUSSEL, D.; KHANIZADEH, S. Yield, fruit quality, antioxidant capacity and phenolic composition of advanced *raspberry* lines from Quebec. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 2, p. 278-284, 2013.

ZIELINSKA, M.; MICHALSKA, A. Microwave-Assisted Drying of *Blueberry* (*Vaccinium corymbosum* L.) Fruits: Drying Kinetics, Polyphenols, Anthocyanins, Antioxidant Capacity, Colour and Texture. **Food Chemistry**, 2016.

ZUO, Y.; WANG, C.; ZHAN, J. Separation, characterization, and quantitation of benzoic and phenolic antioxidants in American *cranberry* fruit by GC-MS. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 13, p. 3789-3794, 2002.

APÊNDICE A

Tabelas referentes à modelagem matemática da reometria das suspensões de sólidos de *cranberries* desidratadas nas faixas de concentração e temperatura avaliadas.

Tabela 29 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 10% e 20 °C

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	10	20		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,993	0,0136	4,20	0,91
Herschel-Bulkley	0,999	0,0025	0,69	1,00
Casson	0,991	0,0126	2,03	1,00
Bingham	0,991	0,0151	4,38	0,95
Newton	0,990	0,0157	4,20	1,02

Tabela 30 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 10% e 60 °C

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	10	60		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,990	0,0101	5,79	0,85
Herschel-Bulkley	0,999	0,0027	1,52	1,00
Casson	0,980	0,0154	3,57	0,99
Bingham	0,983	0,0131	7,66	0,91
Newton	0,974	0,0162	7,51	1,22

Tabela 31 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 20% e 40 °C (ponto central) para a primeira repetição

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	20	40		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,996	0,0140	1,41	0,99
Herschel-Bulkley	0,998	0,0104	1,03	1,00
Casson	0,995	0,0096	0,96	1,00
Bingham	0,976	0,0353	4,44	1,03
Newton	0,048	0,2226	28,63	0,1399

Tabela 32 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 20% e 40 °C (ponto central) para a segunda repetição

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	20	40		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,998	0,0099	0,93	1,00
Herschel-Bulkley	0,998	0,0091	0,91	1,00
Casson	0,989	0,0122	1,24	1,00
Bingham	0,965	0,0407	4,84	1,02
Newton	0	0,2645	30,69	0,1204

Tabela 33 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 20% e 40 °C (ponto central) para a terceira repetição

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	20	40		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,992	0,0203	1,77	0,99
Herschel-Bulkley	0,995	0,0162	1,43	1,00
Casson	0,992	0,0109	1,07	1,00
Bingham	0,973	0,0385	4,05	1,02
Newton	0	0,2729	29,95	0,1236

Tabela 34 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 30% e 20 °C

Modelo	Concentração (%)		Temperatura, °C	
	30	20		
	R^2	$RMSE$	P	Bf
Ostwald de Waelle	0,987	0,1607	1,94	1,0
Herschel-Bulkley	0,992	0,1299	1,62	1,0
Casson	0,988	0,0293	0,81	1,0
Bingham	0,969	0,2533	3,30	1,01
Newton	0	2,3791	32,19	0,0996

Tabela 35 – Parâmetros estatísticos para os modelos de escoamento ajustados aos dados experimentais a 30% e 60 °C

Modelo	Concentração (%)	Temperatura, °C		
	30	60	<i>P</i>	<i>Bf</i>
	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>		
Ostwald de Waelle	0,950	0,7091	7,68	1,12
Herschel-Bulkley	0,986	0,3697	2,91	1,01
Casson	0,944	0,1300	3,93	1,01
Bingham	0,925	0,8659	9,26	1,09
Newton	0,838	1,2729	11,56	0,6570

Tabelas referentes aos parâmetros dos modelos reológicos de Herschel-Bulkley, Ostwald de Waelle, Bingham e Newton.

Tabela 36 – Parâmetros reológicos do modelo de Herschel-Bulkley

<i>x</i> ₁ , °C	<i>x</i> ₂ (%)	Parâmetro		
		<i>K</i> _H (Pa·s)	<i>n</i> _H	<i>τ</i> ₀ (Pa)
20	10	0,001 ± 0,0002	1,517 ± 0,0517	0,100 ± 0,0080
60	10	1,777·10 ⁻⁴ ± 0,0001	1,704 ± 0,0943	0,059 ± 0,0073
40	20	0,569 ± 0,0954	0,518 ± 0,0807	0,177 ± 0,0893
40	20	0,713 ± 0,1351	0,396 ± 0,0726	0,111 ± 0,1292
40	20	0,592 ± 0,1527	0,510 ± 0,1226	0,265 ± 0,1431
20	30	3,850 ± 1,3513	0,482 ± 0,1592	2,869 ± 1,2726
60	30	3,105·10 ³ ± 4,823·10 ⁵	0,002 ± 3,331·10 ⁻¹	-3,119·10 ³ ± 4,8227·10 ⁵

Tabela 37 – Parâmetros reológicos do modelo de Ostwald de Waelle

<i>x</i> ₁ , °C	<i>x</i> ₂ (%)	Parâmetro	
		<i>n</i>	<i>K</i> (Pa·s ^{<i>n</i>})
20	10	1,064 ± 0,0555	0,006 ± 0,0013
60	10	1,186 ± 0,0746	0,002 ± 0,0006
40	20	0,396 ± 0,0143	0,756 ± 0,0084
40	20	0,343 ± 0,0090	0,828 ± 0,0058
40	20	0,353 ± 0,0177	0,870 ± 0,0120
20	30	0,276 ± 0,0173	6,835 ± 0,0916
60	30	0,704 ± 0,0959	0,726 ± 0,2715

Tabela 38 – Parâmetros reológicos do modelo de Bingham

x_1 , °C	x_2 (%)	Parâmetro	
		μ_{pl} (Pa·s)	τ_0 (Pa)
20	10	$0,008 \pm 0,0004$	$-0,011 \pm 0,0199$
60	10	$0,005 \pm 0,0003$	$-0,025 \pm 0,0173$
40	20	$0,262 \pm 0,0205$	$0,451 \pm 0,0362$
40	20	$0,247 \pm 0,0236$	$0,536 \pm 0,0417$
40	20	$0,268 \pm 0,0224$	$0,554 \pm 0,0394$
20	30	$1,640 \pm 0,1472$	$4,849 \pm 0,2596$
60	30	$0,176 \pm 0,025$	$2,460 \pm 1,142$

Tabela 39 – Parâmetros reológicos do modelo de Newton

x_1 , °C	x_2 (%)	Parâmetro
		μ (Pa·s)
20	10	$0,007 \pm 0,0001$
60	10	$0,004 \pm 0,0001$
40	20	$0,512 \pm 0,0670$
40	20	$0,542 \pm 0,0692$
40	20	$0,485 \pm 0,0564$
20	30	$4,039 \pm 0,6031$
60	30	$0,227 \pm 0,125$