
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Avaliação da Influência da Temperatura e da Concentração da Solução de
Sacarose na Desidratação Osmótica de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.)**

- Dissertação de Mestrado -

Cláudia Leites Luchese

Porto Alegre
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Avaliação da Influência da Temperatura e da Concentração da Solução de Sacarose na Desidratação Osmótica de *Physalis* (*Physalis peruviana* L.)

Cláudia Leites Luchese

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Co-orientadora:

Dr.^a Poliana Deyse Gurak

Porto Alegre

2013

AGRADECIMENTOS

Às minhas orientadoras Ligia Damasceno Ferreira Marczak e Poliana Deyse Gurak pela confiança, incentivo e amizade durante a realização desta dissertação. Muito obrigada pelos conselhos, ideias e principalmente por serem meus guias. Obrigada pela orientação.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos e ao grupo de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias pelo convívio e amizade. Cada um de vocês teve a sua parcela de contribuição para a realização deste trabalho.

À Professora Isabel Cristina Tessaro por estar sempre disposta a me auxiliar, participando ativamente das discussões realizadas ao longo deste trabalho.

Ao Professor Alessandro Rios do Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos por disponibilizar o equipamento de análise de cor.

Gostaria também de aproveitar essa oportunidade para agradecer a todos os professores que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal.

Ao Departamento de Engenharia da Química pela estrutura física dos laboratórios disponibilizada, e aos técnicos de laboratório por facilitarem a realização dos experimentos. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, ao CNPq, a Fapergs e a Capes pelo suporte financeiro.

À minha família e amigos, muito obrigada pelo apoio e incentivo. E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação: *Avaliação da Influência da Temperatura e da Concentração da Solução de Sacarose na Desidratação Osmótica de Physalis (Physalis peruviana L.)*, elaborada por Cláudia Leites Luchese, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Dr.^a Renata Valeriano Tonon

Prof. Dr. Alessandro de Oliveira Rios

Prof.^a Dr.^a Florencia Cladera Olivera

Resumo

A *Physalis peruviana* Linnaeus é uma fruta considerada exótica que possui elevado custo de comercialização, principalmente nos mercados internacionais. Suas propriedades nutracêuticas e o aumento da sua produtividade no Estado do Rio Grande do Sul, associados à sua elevada perecibilidade definiram o objetivo deste trabalho: estudar o processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica de physalis. Diversos trabalhos que avaliam as propriedades dos compostos bioativos da physalis através de ensaios *in vitro* e *in vivo* estão disponíveis na literatura, no entanto, há uma carência de informações a respeito de processos de industrialização desta fruta. Neste trabalho foi realizada a desidratação osmótica da physalis avaliando os efeitos da temperatura (variando de 40 a 70 °C), da concentração da solução osmótica de sacarose (variando de 40 a 70 g por 100 g de solução) e da interação dessas variáveis através de planejamento experimental 2² com três repetições no ponto central (em duplicata). Análises de umidade (método gravimétrico), sólidos solúveis (refratômetro), açúcares totais (cromatografia líquida de alta eficiência) foram realizadas ao longo do processo de desidratação osmótica, enquanto que, as análises de carotenoides totais (espectrofotômetro), atividade de água (método higrométrico) e cor (escala CIELAB) foram realizadas para a fruta *in natura* e após 10 horas de processamento. Adicionalmente, testes utilizando uma sonda de ultrassom (frequência de 20 KHz, amplitude de 80 % durante 30 minutos) como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica foram realizados, a fim de aumentar a permeabilidade da casca cerosa desta fruta. Além disso, foram realizadas análises de atividade de água e da viscosidade das soluções osmóticas utilizadas neste trabalho. Os resultados mostraram que a utilização da sonda de ultrassom como pré-tratamento não apresentou diferenças estatisticamente significativas para nenhum dos parâmetros estudados, dentro da faixa de temperatura e concentração avaliadas. O modelo de Rastogi & Raghavarao mostrou-se adequado para a determinação do conteúdo de umidade e de sacarose no equilíbrio, assim como a utilização do modelo de difusão da Segunda Lei de Fick para a determinação da difusividade mássica efetiva da água e da sacarose na physalis usando os cinco primeiros termos da série. A difusividade mássica efetiva da água variou de 2,44 - 7,60 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, enquanto que a da sacarose variou de 2,13 - 3,20 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹. Dentre todas as condições estudadas no planejamento experimental, o processo de desidratação osmótica mostrou-se mais eficiente quando realizado na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 g por 100 g de solução. Nessa condição experimental houve uma elevada perda de água (aproximadamente 83 %), além de uma redução estatisticamente significativa na atividade de água da fruta (passando de 0,979 para 0,872 após 10 horas), no entanto, ocorreu a maior perda de carotenoides totais (aproximadamente 50 %). Nessa condição experimental, a matriz do tecido da physalis sofreu alterações que foram comprovadas através da análise microestrutural realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Adicionalmente, verificou-se que nenhum dos tratamentos realizados promoveu modificações visualmente perceptíveis na diferença global de cor (ΔE^*) devido ao processo de desidratação osmótica.

Palavras-chave: carotenoides, análise colorimétrica, ultrassom, atividade de água, microscopia eletrônica de varredura, difusividade mássica efetiva.

Abstract

Physalis peruviana Linnaeus is considered to be an exotic fruit, with a high cost of commercialization, especially in international markets. Its nutraceutical properties and increased productivity in the state of Rio Grande do Sul, associated with its high perishability defined the goal of this work is the following: to study the process of mass transfer during the osmotic dehydration of physalis. It is noteworthy that several studies have evaluated the properties of the bioactive compounds of physalis both in vitro and in vivo; however, there is a shortage of information in the literature regarding the industrialization of physalis. In this work the osmotic dehydration of physalis was carried out evaluating the effects of temperature (ranging from 40 to 70 °C), osmotic sucrose solution concentration (ranging from 40 to 70 g per 100 g solution) and the interaction of these variables by a 2² experimental design, with three replicates at the center point (in duplicate). Analyses of moisture content (gravimetric method), soluble solids (refractometer) and total sugars (high performance liquid chromatography - HPLC) were performed along the osmotic dehydration process. Content of total carotenoids (spectrophotometer), water activity (hygrometric method) and color (CIELAB scale) were analyzed for the fresh fruit and after 10 hours of processing. In addition, tests using an ultrasound probe (frequency 20 kHz, amplitude of 80 % for 30 minutes) as a pretreatment for the process of osmotic dehydration were performed to increase the permeability of the waxy skin of this fruit. Furthermore, analyses of the water activity and viscosity of the osmotic solutions used were carried out. The results show that the use of the ultrasound probe as a pre-treatment did not yield statistically significant differences for any of the parameters studied within the temperature range at the concentrations assessed. The model of Rastogi & Raghavarao proved to be suitable for the determination of equilibrium content; Fick's Second Law was satisfactorily used to determine the effective diffusivity of water and sucrose for a spherical geometry. Thus, the effective diffusivity of water was calculated and ranged from 2.44 to 7.60 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, while that of sucrose ranged from 2.13 to 3.20 x 10⁻¹⁰ m² s⁻¹. Among all conditions studied in the experimental design, the osmotic dehydration process was more efficient when performed at a temperature of 70 °C and an osmotic solution concentration of 70 g per 100 g of solution. In these conditions, there was a high water loss (approximately 83 %) and a statistically significant reduction in the water activity of this fruit (from 0.979 to 0.872 after 10 hours); however, the greatest loss of total carotenoids (approximately 50 %) was observed. Under this experimental condition, the tissue matrix of physalis suffered structural changes, as proven through Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. Additionally, it was found that none of the treatments performed promoted visually perceptible changes in the overall color difference (ΔE^*) due to processing.

Keywords: carotenoids, colorimetric analysis, ultrasound probe, water activity, scanning electron microscopy, effective mass diffusivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Physalis peruviana</i> Linnaeus.	6
Figura 2. Estrutura do all- <i>trans</i> - β -caroteno.	14
Figura 3. Micrografia da <i>Physalis peruviana</i> L. obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura (Fonte: MARÍN, 2009).	16
Figura 4. Transferência de massa em contracorrente decorrente da imersão de um alimento (geometria esférica) em uma solução concentrada de sacarose.	21
Figura 5. Mecanismo para desidratação osmótica em material heterogêneo biológico (adaptado de RASTOGI, ANGERSBACH & KNORR, 2000).	29
Figura 6. Variação da taxa de desidratação (-dx/dt) versus o conteúdo de umidade em base seca durante o processo de desidratação osmótica.	34
Figura 7. Escala de cor da physalis, baseada na NTC 4580 (ICONTEC, 1999).	44
Figura 8. Fluxograma ilustrativo das etapas envolvidas no preparo das amostras e na parte experimental do processamento via desidratação osmótica.	44
Figura 9. Representação esquemática do aparato experimental montado para a realização do processo de desidratação osmótica.	46
Figura 10. Aparato experimental utilizado para a realização dos experimentos de desidratação osmótica de physalis.	46
Figura 11. Fotografia da sonda de ultrassom utilizada.	48
Figura 12. Fluxograma das etapas realizadas para o preparo das amostras para análise em HPLC.	51
Figura 13. Curva de calibração para a determinação de açúcares em HPLC.	52
Figura 14. Diagrama representativo do sistema de cores CIELAB (Fonte: MINOLTA, 1994).	55
Figura 15. Variação adimensional do teor de umidade com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.	60
Figura 16. Efeitos padronizados do Diagrama de Pareto para a perda de água (WL).	63
Figura 17. Linhas de contorno para a perda de água em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.	65

Figura 18. Taxa de desidratação osmótica de physalis versus conteúdo de umidade (em base seca) para o experimento realizado na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix.....	67
Figura 19. Número de Fourier versus o tempo para as condições experimentais de temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix.....	69
Figura 20. Variação adimensional do teor de sólidos solúveis com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.....	72
Figura 21. Diagrama de Pareto para análise de incorporação de sólidos solúveis (refratômetro).	75
Figura 22. Linhas de contorno para a incorporação de sólidos solúveis (análise realizada em refratômetro, °Brix) em função da temperatura e da concentração da solução osmótica de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.	77
Figura 23. Variação adimensional do teor de açúcar com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.....	78
Figura 24. Diagrama de Pareto para análise de incorporação de açúcar (HPLC).....	80
Figura 25. Linhas de contorno para a incorporação de açúcar (análise em HPLC) em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.....	81
Figura 26. Correlação entre as metodologias de análise de incorporação de sólidos solúveis (refratômetro) e de açúcares (HPLC) para a condição experimental de temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix.....	83
Figura 27. Diagrama de Pareto para a análise de carotenoides.....	89
Figura 28. Linhas de contorno para a perda de carotenoides em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.	91
Figura 29. Espectro UV-visível do extrato de carotenoides da physalis <i>in natura</i> e do extrato de physalis após 10 horas de desidratação osmótica na temperatura de 70 °C e concentração de sacarose de 70 °Brix, e espectro do padrão all- <i>trans</i> -β-caroteno.....	92
Figura 30. Micrografia de um corte transversal junto da região do pedúnculo da physalis <i>in natura</i> nas magnitudes de 50 e 180 vezes, respectivamente, obtida através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).	93
Figura 31. Micrografia de um corte transversal junto da região do pedúnculo da physalis após 10 horas de processamento via desidratação osmótica na temperatura de 70 °C e concentração	

da solução osmótica de 70 °Brix na magnitude de 50 e 180 vezes, respectivamente, obtida através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....93

Figura 32. Variação da perda de umidade normalizada com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica em função do tempo de imersão. 101

Figura 33. Variação do ganho de sólidos normalizado, expresso em glicose, obtido através da análise de açúcares no HPLC, com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica em função do tempo de imersão. 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Qualidade das frutas physalis de acordo com a NTC 4580.	7
Tabela 2. Composição nutricional da <i>Physalis peruviana</i> L. (em 100 g de polpa)	8
Tabela 3. Parâmetros físico-químicos para <i>Physalis peruviana</i> L.	9
Tabela 4. Principais compostos bioativos da <i>Physalis peruviana</i> L.	13
Tabela 5. Planejamento Experimental 2 ² com repetições no ponto central realizado em duplicata.	47
Tabela 6. Caracterização da <i>Physalis peruviana</i> L. <i>in natura</i>	59
Tabela 7. Perda de água (WL) após 10 horas de desidratação osmótica de physalis.	62
Tabela 8. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a perda de água.	64
Tabela 9. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão da perda de água.	65
Tabela 10. Conteúdo de umidade no equilíbrio x_{∞}^w e os respectivos coeficientes de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.	68
Tabela 11. Difusividade mássica efetiva da água $D_{ef}^w \cdot 10^{10}$ em $m^2 s^{-1}$ e o coeficiente de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.	70
Tabela 12. Incorporação adimensional de sólidos solúveis (SS) após 10 horas de desidratação osmótica de physalis.	73
Tabela 13. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a incorporação de sólidos solúveis.	75
Tabela 14. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de incorporação de sólidos durante o processo de desidratação osmótica de physalis.	76
Tabela 15. Incorporação de açúcares (SA) no final do processo de desidratação osmótica.	78
Tabela 16. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a incorporação de açúcar.	79
Tabela 17. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de incorporação de açúcar durante o processo de desidratação osmótica de physalis.	80

Tabela 18. Correlação entre o resultado da análise de incorporação de sólidos utilizando refratômetro e HPLC.	83
Tabela 19. Conteúdo de açúcar no equilíbrio x_{∞}^{sac} e os respectivos coeficientes de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.	85
Tabela 20. Difusividade mássica efetiva para a sacarose $D_{ef}^{sac} \cdot 10^{10}$ em $m^2 s^{-1}$ e o coeficiente de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.	85
Tabela 21. Razão entre o conteúdo de carotenoides da physalis após 10 horas de processamento e das amostras <i>in natura</i> para cada condição experimental.	88
Tabela 22. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a análise de carotenoides totais.	89
Tabela 23. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de perda de carotenoides durante o processo de desidratação osmótica de physalis.	90
Tabela 24. Resultados de diferença global de cor (ΔE^*) entre as amostras de physalis <i>in natura</i> e das amostras após o processo de desidratação osmótica.	95
Tabela 25. Viscosidade dinâmica ($N s m^{-2}$) das soluções de sacarose nas respectivas temperaturas de operação (temperatura da solução osmótica de sacarose na qual foi realizado o experimento).	97
Tabela 26. Atividade de água das amostras de physalis <i>in natura</i> e após a realização do processo de desidratação osmótica para cada condição do planejamento experimental.	98
Tabela 27. Atividade de água das amostras de physalis <i>in natura</i> e das soluções osmóticas utilizadas durante os experimentos de desidratação osmótica (todas as medidas foram realizadas na temperatura de 25 °C).	100
Tabela 28. Perda de água, difusividade mássica efetiva da água, ganho de sólidos solúveis, ganho de açúcares, conteúdo de carotenoides totais e diferença global de cor (ΔE^*) para os experimentos com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica (após 10 horas de processamento).	103
Tabela 29. Atividade de água das amostras de physalis <i>in natura</i> (t = 0 h) e após a realização do processo de desidratação osmótica (na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix) durante 10 horas (t = 10 h) com e sem o uso de pré-tratamento de sonda de ultrassom.	106

Lista de siglas, abreviaturas e símbolos

a^*	parâmetro colorimétrico do eixo de cores vermelho (+) ao verde (-)
a_w	atividade de água
ABTS	radical sintético 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzotiazolina-6-sulfonato)
b^*	parâmetro colorimétrico do eixo de cores amarelo (+) ao azul (-)
b.s.	base seca
b.u.	base úmida
C	concentração molar (kmol m^{-3})
C_{ab}^*	croma ou saturação de cor
CLAE	Cromatografia Líquida de Alto Desempenho
D_{AB}	difusividade mássica do componente de A no componente B ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_{ef}	difusividade mássica efetiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_{ef}^{sac}	difusividade mássica efetiva da sacarose ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_{ef}^w	difusividade mássica efetiva da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
DPPH	radical sintético 2,2-diphenil-1-picrilhidrazil
Fo	Número de Fourier
GL	graus de liberdade (ANOVA)
h_{ab}	ângulo hue, indica a tonalidade
HPLC	High Performance Liquid Chromatography

i	número de termos da série
k_1 e k_2	parâmetros do modelo de Peleg
L^*	parâmetro de cor que indica a luminosidade
m	massa (g)
M	massa da amostra úmida
m/m	massa por massa
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
M_s	massa da amostra seca
MQ	média quadrática, obtida dividindo SQ por GL (ANOVA)
r	raio da esfera (m)
R^2	coeficiente de determinação
S_1 e S_2	constantes do modelo de Azuara
SA	incorporação de açúcares, análise realizada por HPLC
SS	incorporação de sólidos solúveis (°Brix), análise realizada em refratômetro
SQ	soma dos quadrados (ANOVA)
T	temperatura (°C)
t	tempo (s) ou (h)
WL	perda de água (g de água por g de sólidos secos)
x^w	teor de umidade (g de água por g de sólidos secos)
x_o^w	teor de umidade no início (g de água por g de sólidos secos)
x_t^w	teor de umidade em um tempo t qualquer (g de água por g de sólidos secos)
x_∞^w	teor de umidade no equilíbrio (g de água por g de sólidos secos)
x_t^{SS}	teor de sólidos solúveis em um tempo t qualquer (°Brix)
x_o^{SS}	teor de sólidos solúveis no início (°Brix)

x^{sac}	teor de açúcares (g de glicose por g de amostra)
x_0^{sac}	teor de açúcares presente inicialmente na physalis (g de glicose por g de amostra)
x_t^{sac}	teor de açúcares em um tempo t qualquer (g de glicose por g de amostra)
x_∞^{sac}	teor de açúcares no equilíbrio (g de glicose por g de amostra)
θ e ϕ	coordenadas esféricas
λ	comprimento de onda (nm)
μ	viscosidade dinâmica (N s m ⁻²)
ρ	massa específica (kg m ⁻³)

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	5
2.1. A <i>Physalis</i>	5
2.1.1. Características da planta	5
2.1.2. Características da fruta	7
2.2. O Processo de Desidratação Osmótica	20
2.2.1. O fenômeno da difusão mássica	25
2.2.2. Difusividade mássica.....	26
2.2.3. Difusão mássica em alimentos	26
2.2.4. Difusividade mássica efetiva	27
2.2.5. Modelos para prever a concentração de equilíbrio	30
2.2.5. Modelagem matemática da desidratação osmótica	34
2.3. Utilização de Ultrassom como Pré-tratamento ao Processo de Desidratação Osmótica	38
Capítulo 3 - Materiais e Métodos	43
3.1. Matéria-prima e Reagentes	43
3.1.1. A fruta – <i>Physalis peruviana</i> Linnaeus	43
3.1.2. Solução osmótica de sacarose.....	45
3.2. Processo de Desidratação Osmótica	45
3.3. Pré-tratamento utilizando Sonda de Ultrassom	47
3.4. Análises Físico-Químicas	48
3.4.1. Determinação do grau de maturação	49
3.4.2. Determinação do conteúdo de umidade.....	49
3.4.3. Determinação do teor de açúcares	50
3.5. Modelo matemático	52
3.6. Determinação do conteúdo de carotenoides totais	53
3.7. Determinação da atividade de água	54
3.8. Análise colorimétrica	54
3.9. Microscopia eletrônica de varredura	56
3.10. Viscosidade da solução osmótica	56

3.11. Análise estatística	56
Capítulo 4 - Resultados e Discussão	59
4.1. Matéria-prima	59
4.2. Perda de Água	60
4.2.1. Determinação do conteúdo de umidade no equilíbrio	66
4.2.2. Difusividade mássica efetiva para a água	68
4.3. Incorporação de sólidos	72
4.3.1. Análise de sólidos solúveis (refratômetro).....	72
4.3.2. Análise de açúcares (HPLC)	77
4.3.3. Correlação dos dados de incorporação de solutos durante o processamento.....	81
4.3.4. Determinação da difusividade mássica efetiva para a sacarose	84
4.4. Análise de Carotenoides Totais	87
4.5. Análise Microestrutural (MEV)	92
4.6. Análise Colorimétrica	94
4.7. Viscosidade das Soluções Osmóticas	96
4.8. Atividade de Água (a_w)	98
4.9. Uso da Sonda de Ultrassom como Pré-tratamento	100
Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	107
Referências Bibliográficas	111
Apêndice A	125
Apêndice B	129
Apêndice C	133
Apêndice D	135
Apêndice E	139
Apêndice F	143
Apêndice G	144

Capítulo 1 - Introdução

Physalis peruviana L., fruta pertencente à família *Solanaceae*, é uma fruta comumente encontrada em todas as regiões de clima temperado e subtropical do mundo. O principal produtor mundial de physalis é a Colômbia, enquanto que no Brasil os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina destacam-se pelo aumento da produção desta fruta, principalmente, a partir do ano de 2009, especialmente das espécies *angulata* e *peruviana*. A comercialização da physalis em mercados locais tem atraído o interesse de produtores de pequeno, médio e grande porte. O rápido crescimento da demanda de produção desta fruta está principalmente associado às suas características nutracêuticas e medicinais, uma vez que apresenta elevados níveis de compostos antioxidantes que atuam no combate às células cancerígenas.

Entretanto, a principal dificuldade de comercialização desta fruta é devido à sua elevada perecibilidade, implicando em grandes perdas pós-colheita; portanto, o processamento de physalis via desidratação osmótica representa uma alternativa para o aproveitamento do excedente dessas frutas, agregando valor ao produto final. Essa tecnologia tem sido usada, principalmente, como pré-tratamento de alguns processos convencionais de secagem, como a liofilização, a secagem a vácuo e a secagem utilizando ar quente, a fim de melhorar a qualidade final, reduzir os custos energéticos e até mesmo, para o desenvolvimento de novos produtos. Além disso, vale salientar que foram encontrados na literatura diversos estudos de caracterização dos compostos bioativos da physalis e da sua atividade antioxidante em estudos *in vitro* e *in vivo*. Entretanto, há uma carência de pesquisas relacionadas aos processos de industrialização de physalis.

O processo de desidratação osmótica consiste em colocar os alimentos em contato com soluções concentradas de sólidos solúveis que possuem elevada pressão osmótica e baixa

atividade de água. A complexa estrutura celular dos alimentos pode ser considerada uma membrana semipermeável, e a diferença de potencial químico da água entre o alimento e a solução osmótica é a força motriz para o processo de desidratação. Desta forma, ocorrem dois fluxos de transferência de massa em contracorrente: a perda de água do alimento para a solução osmótica e a transferência de soluto da solução osmótica para o alimento. Além de reduzir o requerimento de energia em processos posteriores de secagem, a remoção osmótica de água dos materiais celulares, como frutas e legumes, é frequentemente utilizada como um processamento prévio a fim de melhorar a qualidade sensorial do produto final. O processo de desidratação osmótica utiliza temperaturas moderadas, minimizando mudanças nutricionais nos alimentos e favorecendo a preservação dos compostos bioativos, da cor, do sabor e do aroma das frutas.

Diversos trabalhos científicos têm descrito o comportamento de diferentes produtos alimentícios durante o processamento osmótico uma vez que a composição estrutural da fruta e as condições operacionais são os principais parâmetros que influenciam este processo de desidratação. Os estudos realizados buscam compreender a transferência interna de massa que ocorre durante a desidratação osmótica de alimentos. Para tanto, a fim de estimar a difusividade mássica efetiva da água e do soluto no alimento, utiliza-se um modelo matemático baseado na Segunda Lei de Difusão de Fick, atendendo aos pressupostos envolvidos nessa lei.

Dentro deste contexto, situa-se a motivação deste trabalho: estudar o processo de desidratação osmótica de physalis com o objetivo de reduzir a quantidade de água presente na fruta promovendo, assim, um aumento da sua estabilidade e do seu tempo de vida útil. O objetivo geral deste trabalho foi investigar o processo de desidratação osmótica da *Physalis peruviana* L. visando avaliar o efeito da temperatura (40, 55 e 70 °C) e da concentração de sacarose (40, 55 e 70 g por 100 g de solução) sobre o mecanismo de transferência de massa da água e da sacarose, através de um planejamento fatorial 2², utilizando o software STATISTICA para avaliação estatística dos resultados. Além disso, foi avaliada a utilização da aplicação de ultrassom como pré-tratamento do processo de desidratação osmótica a fim de aumentar a taxa de perda de umidade da physalis. Considerando este objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho foram:

- quantificar o teor de umidade e o teor de açúcares em função do tempo de imersão para diferentes tratamentos;

-
- investigar o efeito da concentração de sacarose e da temperatura da solução osmótica sobre a transferência de massa da água e da sacarose;
 - verificar a aplicabilidade do modelo proposto por Rastogi & Raghavarao no processo de desidratação osmótica de physalis, determinando as condições de equilíbrio para as diferentes condições experimentais de temperatura e concentração de sacarose;
 - estimar a difusividade mássica efetiva da água e da sacarose em diferentes temperaturas e concentrações de solução osmótica a partir da solução analítica da Segunda Lei de Fick em coordenadas esféricas;
 - quantificar o teor de carotenoides totais, a diferença global de cor e avaliar a atividade de água das amostras de physalis *in natura* e após 10 horas de processamento.
 - avaliar os efeitos da utilização do ultrassom como pré-tratamento do processo de desidratação osmótica de physalis.

O presente trabalho está estruturado no formato descrito a seguir. No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos sobre o processo de transferência de massa em sistemas alimentícios, descrevendo o fenômeno da difusão mássica. Também estão descritas as formulações matemáticas utilizadas para a determinação da difusividade mássica efetiva da água e da sacarose, baseadas na Segunda Lei de Difusão de Fick. Além disso, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre algumas características da physalis, dentre elas: propriedades físico-químicas e compostos nutracêuticos, aspectos de industrialização e comercialização.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento deste trabalho, incluindo a descrição dos métodos de análise. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Finalmente, as conclusões sobre os resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

Capítulo 2 - Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as principais características da fruta *physalis*: seus aspectos nutricionais, físico-químicos, de microestrutura, sua importância do ponto de vista nutracêutico, dados socioeconômicos e aspectos de industrialização e comercialização da fruta. Os conceitos envolvidos no processo de desidratação osmótica, os fundamentos teóricos sobre a transferência de massa em alimentos, descrevendo o fenômeno da difusão mássica em meios porosos e da difusividade mássica efetiva também são apresentados neste capítulo. Finalmente é apresentada e discutida a formulação matemática para o cálculo da difusividade mássica efetiva baseada na Segunda Lei da Difusão de Fick.

2.1. A *Physalis*

2.1.1. *Características da planta*

Physalis peruviana L. é uma fruta conhecida como *uchuva* na Colômbia, *uvilla* no Equador, *aguaymanto* no Peru, *topotopo* na Venezuela, *joá de capote* no nordeste brasileiro e *goldenberry* ou *cape gooseberry* nos Estados Unidos e Europa. Há mais do que 80 espécies de *physalis* que podem ser encontradas pelo mundo, sendo que as principais são a *Physalis angulata* Linnaeus, a *Physalis minima* L., a *Physalis pubescens* L., a *Physalis alkekengi* L. e a *Physalis peruviana* L., mostrada na Figura 1, que é a cultivar mais conhecida (CEDENO & MONTENEGRO, 2004; RAMADAN, 2011; PUENTE *et al.*, 2011).

Figura 1. *Physalis peruviana* Linnaeus.



A *Physalis peruviana* Linnaeus, originária da região dos Andes sul-americanos, pertence à família *Solanaceae* e ao gênero *Physalis*. É uma planta herbácea, um semiarbusto perene cultivado em zonas subtropicais que cresce entre 0,6 e 0,9 metros de altura e, em alguns casos, pode chegar até 2 metros (MAYORGA *et al.*, 2001; PUENTE *et al.*, 2011). Ademais, possui raiz fibrosa ramificada e talo herbáceo com pilosidades. As suas flores são hermafroditas, com o cálice verde e a corola amarela que podem ser facilmente polinizadas por insetos, pelo vento e por autopolinização (TAPIA & FRIES, 2007).

A *Physalis peruviana* L. apresenta elevado potencial de cultivo, uma vez que pode crescer em solos que possuem baixos requisitos de fertilização (FISCHER & ALMANZA, 1993; MAYORGA *et al.*, 2001). Além disto, se adapta muito bem em solos levemente ácidos e neutros (com pH variando entre 5,5 e 7,3) e não tolera solos argilosos porque possui raízes superficiais (TAPIA & FRIES, 2007). Segundo Puente *et al.* (2011), as recomendações para sua adubação seguem os mesmos pré-requisitos da cultura do tomateiro.

De acordo com Cedeño & Montenegro (2004), as condições climáticas que favorecem seu cultivo incluem precipitação variando entre 1000 e 2000 mm (devendo ter água suficiente durante o crescimento inicial, mas não durante o amadurecimento da fruta), elevada luminosidade variando entre 1500 e 2000 horas de luz por ano, umidade relativa de 70 a 80 % e temperaturas variando entre 10 e 30 °C (baixas temperaturas com geada podem causar a morte da planta e temperaturas muito altas podem prejudicar sua floração e frutificação, sendo que a temperatura ótima de cultivo é de aproximadamente 18 °C).

2.1.2. Características da fruta

A fruta *physalis* é caracterizada como uma baga carnosa arredondada, com diâmetro variando entre 1,25 e 2,50 cm e massa entre 4 e 10 gramas (PUENTE *et al.*, 2011). A estrutura interna da *physalis* é composta de aproximadamente 100 a 300 sementes pequenas (TAPIA & FRIES, 2007), ou seja, é semelhante ao interior de um tomate cereja. A *physalis* é protegida por um cálice de folhas secas que cobre completamente a fruta ao longo de seu desenvolvimento e amadurecimento. De acordo com Galvis, Fischer & Gordillo (2005), a *physalis* é composta por aproximadamente 70 % de polpa, 3,5 % de casca e 26,5 % de sementes, o volume teórico médio das amostras de *physalis* é de 3,4 cm³, enquanto que a sua esfericidade é de 0,98.

Usando como fonte o Instituto Colombiano de Normas Técnicas, NTC 4580, a qualidade das frutas pode ser dada pela escala de cores de acordo com o grau de maturação da *physalis*, o conteúdo de ácido cítrico e o teor de sólidos solúveis, conforme está indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Qualidade das frutas *physalis* de acordo com a NTC 4580.

Cor	Aspecto externo da fruta	°Brix (mínimo)	% de ácido cítrico (máximo)	Índice de maturação: (°Brix/% acidez)
Zero	Fruta desenvolvida fisiologicamente, cor verde escuro	9,4	2,69	3,5
Um	Fruta de cor verde um pouco mais clara	11,4	2,70	4,2
Dois	A cor verde se mantém na região do cálice, aparecem tonalidades alaranjadas	13,2	2,56	5,2
Três	Fruta de cor alaranjada clara com brilho verde na região do cálice	14,1	2,34	6,0
Quatro	Fruta de cor alaranjada clara	14,5	2,03	7,1
Cinco	Fruta de cor alaranjada	14,8	1,83	8,1
Seis	Fruta de cor alaranjada intensa	15,1	1,68	9,0

A seguir serão apresentados os aspectos nutricionais, físico-químicos, microestruturais, a importância do ponto de vista nutracêutico, dados socioeconômicos e aspectos de industrialização e comercialização da physalis.

a) Aspectos nutricionais

Na Tabela 2 está apresentada a composição nutricional da physalis; vale lembrar que a composição química das frutas pode variar em função do cultivar, das práticas de cultivo, da fertilidade do solo, da época do ano, do grau de maturação, entre outros fatores. A physalis é uma fruta com alto valor nutricional uma vez que apresenta elevadas quantidades de vitaminas A, B1 (tiamina), B2 (riboflavina) B3 (niacina) e C e de sais minerais como potássio, magnésio, fósforo e ferro além de outros componentes essenciais em menor quantidade, como zinco e cálcio (RAMADAN & MOERSEL, 2004; RAMADAN, 2011; PUENTE *et al.*, 2011).

Tabela 2. Composição nutricional da *Physalis peruviana* L. (em 100 g de polpa)

Componente	Concentração
Energia (kcal)	49 - 73
Proteínas	0,3 - 1,9 %
Gorduras	00,2 - 0,5 %
Carboidratos	11 -19,6 %
Fibras	0,4 - 4,9 %
Cinzas	0,7 – 1 %
Vitamina A (mg)	390 - 1460
Vitamina B1 (mg)	0,1 - 0,18
Vitamina B2 (mg)	0,03 - 0,18
Vitamina B3 (mg)	0,8 - 1,7
Vitamina C (mg)	20 - 46
Potássio (mg)	210 - 350
Magnésio (mg)	7 - 36
Fósforo (mg)	27 - 55
Ferro (mg)	0,3 - 1,5

Fonte: Ramadan & Moersel (2004); Ramadan (2011).

Além dos valores apresentados anteriormente na Tabela 2, Rodrigues *et al.* (2009) determinaram a composição mineral de diversas frutas, incluindo a *Physalis peruviana* L., e encontraram um conteúdo de ferro ($1,47 \pm 0,18$ mg por 100 g de amostra seca) quinze vezes maior do que a quantidade de ferro presente em outras frutas como mamão (*Carica papaya* L.) e laranja (*Citrus sinensis* L.). Vale ressaltar que esse valor é superior aquele encontrado em fontes tradicionais, como por exemplo, o feijão, que contém aproximadamente 0,8 mg de ferro por 100 g de amostra (TACO, 2006). Além disso, Rodrigues *et al.* (2009) também verificaram que a quantidade de potássio (347 ± 3 mg por 100 g de amostra seca) encontrada na physalis foi mais elevada do que os valores encontrados para outras frutas, tais como, mamão (222 mg por 100 g de amostra), morango (184 mg por 100 g de amostra), acerola (165 mg por 100 g de amostra), laranja (158 mg por 100 g de amostra) e maçã (117 mg por 100 g de amostra).

A Tabela 3 apresenta alguns parâmetros físico-químicos da *Physalis peruviana* L., com grau de maturação 4 segundo a NTC 4580, relevantes para o processo de desidratação osmótica; a umidade está na faixa de 76 a 86 % (em base úmida). Segundo Ramadan (2011), a fruta contém aproximadamente 15 % de sólidos solúveis, sendo principalmente açúcares. A determinação do conteúdo de umidade e da atividade de água da fruta durante o processamento de alimentos permite avaliar a suscetibilidade à deterioração e a vida de prateleira das frutas, sendo um indicador de estabilidade microbiológica.

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos para *Physalis peruviana* L.

Parâmetros físico-químicos	Conteúdo
Densidade (g mL^{-1})	1,04
Umidade (b.u.)	76,9 - 85,9 %
°Brix	13 - 15
pH	3,4 - 3,7
Acidez (expressa em % de ácido cítrico)	1,6 - 2,1
Atividade da água	0,988
Sólidos solúveis	13 - 15 %

Fonte: Marín (2009); Restrepo, Cortés & Márquez (2009); Puente *et al.* (2011).

b) Compostos nutraceuticos

Os benefícios da *physalis* estão principalmente associados à presença de compostos nutraceuticos, uma vez que possuem componentes biologicamente ativos que permitem melhorar os aspectos de saúde e reduzir o risco de determinadas doenças. Entre os componentes que estão em maior quantidade é possível verificar elevadas quantidades de ácidos graxos poli-insaturados, vitaminas A, B, E, K1 e C, compostos fenólicos e fitoesteróis, assim como a presença de withanolides e physalinas, que juntos conferem à *physalis* propriedades medicinais (WU *et al.*, 2006; MARÍN, 2009; RAMADAN, 2011; PUENTE *et al.*, 2011; VÁSQUEZ-PARRA, OCHOA-MATÍNEZ & BUSTOS-PARRA, 2013).

Segundo Pérez-Castorena *et al.* (2012) a principal razão que torna o gênero *physalis* interessante é a utilização de algumas das suas espécies na medicina popular de diversos países. No México, a *Physalis philadelphica* é utilizada no tratamento de problemas respiratórios, dores de garganta e tosse. Segundo Lan *et al.* (2009) a *Physalis alkekengi* variedade *francheti* é usada para o tratamento de dores de garganta, tosse, hepatite, malária, problemas urinários e tumores na China. Na medicina popular os povos nativos da Amazônia e do nordeste brasileiro utilizavam as folhas, as frutas e as raízes da *physalis* no combate de diabetes, reumatismo crônico, doenças de pele, bexiga, rins e fígado, no entanto, ainda sem comprovações científicas (WU *et al.*, 2005).

Puente *et al.* (2011) relataram que os fitoesteróis, encontrados em altos níveis em óleos extraídos da *Physalis peruviana* L., apresentaram propriedades benéficas à saúde, além de apresentar atividade anti-inflamatória, antibactericida e antifúngica. No entanto, o melhor efeito comprovado cientificamente relacionado aos fitoesteróis é o efeito hipocolesterolêmico (relacionado a ambos, colesterol total e colesterol LDL, responsável por diminuir os níveis de colesterol da corrente sanguínea). Além disso, segundo Ramadan (2011), o campesterol é o fitoesterol mais abundante em óleos extraídos da casca e da polpa (aproximadamente 0,2 %) e da semente (aproximadamente 1,8 %).

Segundo Ramadan & Moersel (2003), o perfil de ácidos graxos da *Physalis peruviana* L. apresentou concentrações mais elevadas de ácido linoleico (70,5 %) na fração lipídica. Sabe-se que uma alimentação rica em ácido linoleico contribui na prevenção de doenças cardiovasculares, arteriosclerose e hipertensão. Llaverias *et al.* (2013) avaliaram os efeitos de

uma alimentação suplementar baseada em fitoesteróis no processo de formação e progressão de tumores mamários bem caracterizados usando ratos fêmeas. Tanto o desenvolvimento das lesões tumorais nas mamas quando a progressão da doença foram significativamente reduzidos após a ingestão de fitoesteróis. Além disso, verificaram que a suplementação alimentar a base de fitoesteróis foi eficiente na prevenção da oxidação de lipoproteínas em ratos fêmeas com uma alimentação rica em gorduras.

Segundo Pérez-Castorena *et al.* (2012) as pesquisas referentes à composição química do gênero *Physalis* iniciaram na década de 60. No entanto, até o presente momento, esses estudos estiveram mais concentrados nas partes aéreas da planta e na região do caule e das folhas. Compostos químicos como polissacarídeos, vitaesteroides, carotenoides e ésteres de sacarose já foram isolados da *physalis*, enquanto que *physalinas* e flavonoides foram obtidos a partir do cálice desta fruta.

Fang, Liu & Li (2012) relataram que os withanolides - lactonas esteroidais principalmente produzidas pela família *Solanaceae* - apresentaram atividades farmacológicas importantes, incluindo a atividade antimicrobiana, antibactericida, antitumoral, anti-inflamatória, hepatoprotetora e imunomodulatória. Experiências realizadas nos laboratórios de Farmacologia Aplicada da FarManguinhos / FIOCRUZ comprovaram a atividade tripanossomicida (no combate à Doença de Chagas) da *Physalis angulata* L., uma vez que nos ensaios *in vitro* com *Trypanosoma cruzi*, houve morte do parasita em percentuais de 95 a 100 %. Chandrasekaran *et al.* (2013) avaliaram o efeito *anti-Leishmania donovani in vitro* dos withanolides e os resultados deste estudo indicaram que esse composto induziu a apoptose (morte celular programada) devido a elevada produção de ROS (espécies reativas de oxigênio) pelas mitocôndrias.

As *physalinas* - substâncias imunossupressoras do grupo dos vitaesteroides - que também são encontradas nas *physalis*, apresentam efeitos na inibição das respostas indesejadas em doenças autoimunes, alergias e no transplante de órgãos. Produtos naturais têm sido estudados como imunossupressores, uma vez que o uso prolongado de produtos sintéticos é frequentemente acompanhado por efeitos colaterais indesejáveis (PUENTE *et al.*, 2011). As atividades biológicas dos vitaesteroides são justificáveis devido à vasta diversificação de tipos estruturais que este grupo de esteroides é capaz de apresentar. Experiências *in vitro* realizadas pela Fundação Oswaldo Cruz do Rio de Janeiro para

avaliação imunofarmacológica da *Physalis angulata* L. mostraram a capacidade de induzir a proliferação de linfócitos.

No estudo realizado por Soares *et al.* (2006), o tratamento com as physalinas B, F e G preveniu a rejeição do transplante alogênico heterotópico cardíaco em ratos (fêmeas e machos com idade variando entre 6 e 8 semanas - todos os animais utilizados para os testes de laboratório foram tratados de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Fundação Oswaldo Cruz). Os resultados demonstraram a atividade supressora dessas physalinas nos linfócitos e, assim, é possível verificar seu potencial para utilização como agente imunossupressor no tratamento de patologias (como por exemplo, doenças autoimunes, alergias e no transplante de órgãos), devido à inibição de respostas imunológicas indesejadas. Hsu *et al.* (2012) investigaram o efeito anti-melanoma da physalina B extraída da *Physalis angulata* L. Os resultados obtidos são promissores, indicando que essa substância possui potencial como composto quimioterapêutico, eficaz para o tratamento de melanomas malignos. Li *et al.* (2013) avaliaram o efeito das physalinas extraídas de *Physalis alkekengi* var. *francheti* em camundongos saudáveis (modelo *in vivo*) e verificaram que elas possuem potencial para serem usadas como agente natural objetivando restaurar o equilíbrio da flora intestinal.

Puente *et al.* (2011), por sua vez, ressaltam que os principais constituintes ativos da *Physalis peruviana* L. são as physalinas A, B, D e F e glicosídeos, que possuem atividade anticâncer. Dentro deste contexto, tem sido demonstrado por Wu *et al.* (2005) que as physalinas B e F têm uma forte atividade supressora para inibir a proliferação de linfócitos. A physalina F também mostrou efeito antitumoral *in vivo* para leucemia em camundongos. Zavala *et al.* (2006) mostraram que o extrato etanólico de folhas e pedúnculos da *Physalis peruviana* L. são capazes de inibir o crescimento células tumorais.

Além dos fitoesteróis, whitanolides e physalinas, a physalis apresenta elevada quantidade de compostos bioativos, tais como carotenoides, ácido ascórbico e compostos fenólicos. A Tabela 4 apresenta as faixas de valores desses compostos bioativos presentes na *Physalis peruviana* L. relatados pelos autores enumerados de 1 a 3.

Com relação aos compostos fenólicos, quantificados pelo Método de Folin-Ciocalteu, Rop *et al.* (2012) encontraram valores entre 614 e 831 mg de ácido gálico por 100 g de fruta fresca. Restrepo, Cortés & Márquez (2009) e Vasco, Ruales & Eldin (2008), utilizando

physalis com 14 e 18 °Brix, encontraram valores de 40 e 87 mg de ácido gálico por 100 g de fruta fresca, respectivamente. Segundo Rop *et al.* (2012), o principal composto fenólico encontrado na physalis é a quercetina, seguido pela miricetina e pelo caempeferol.

Tabela 4. Principais compostos bioativos da *Physalis peruviana* L.

Compostos Bioativos	Concentração (fruta fresca)
Carotenoides (mg por 100 g) ¹	8 – 1460
Ácido ascórbico (mg por 100g) ²	46 – 102
Compostos fenólicos (mg por 100 g) ³	40 – 831

¹ Ramadan & Moersel (2004), De Rosso & Mercadante (2007), Marín (2009), Restrepo, Cortés & Márquez (2009), Ramadan (2011) e Puente *et al.* (2011), expresso em all-*trans*-β-caroteno.

² Vasco, Ruales & Eldin (2008), Ramadan (2011) e Rop *et al.* (2012).

³ Vasco, Ruales & Eldin (2008), Restrepo, Cortés & Márquez (2009) e Rop *et al.* (2012), expresso em padrão de ácido gálico.

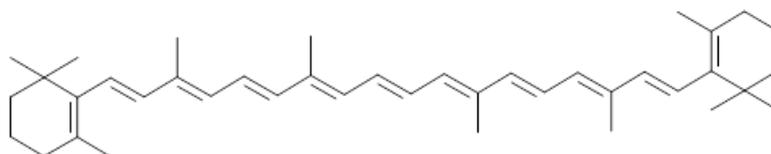
Vasco, Ruales & Eldin (2008) obtiveram um conteúdo de compostos fenólicos para o tomate (*Lycopersicon esculentum*), com 6 °Brix, de 26 mg de ácido gálico por 100 g de fruta fresca, bem inferior ao valor encontrado para a physalis. Os mesmos autores determinaram o conteúdo de ácido ascórbico da physalis e obtiveram um valor de 65 mg por 100 g de fruta fresca, superior ao valor encontrado para o tomate (20 mg por 100 g de fruta fresca). No estudo de Rop *et al.* (2012), o conteúdo de ácido ascórbico da physalis variou entre 66 e 102 mg por 100 g de fruta fresca. Ramadan (2011) verificou o conteúdo de ácido ascórbico para a physalis, tendo encontrado valores próximos de 46 mg por 100 g de fruta, bem superiores aos encontrados para outras frutas: pêra (4 mg 100 g⁻¹), maçã (6 mg 100 g⁻¹) e pêssego (7 mg 100 g⁻¹), e semelhante ao encontrado para a laranja (50 mg 100 g⁻¹) e para o morango (60 mg 100 g⁻¹).

Os carotenoides - pigmentos naturais responsáveis pela coloração laranja de muitos vegetais - são compostos bioativos muito importantes na prevenção de algumas doenças, tais como câncer, devido a sua atividade antioxidante, que contribui no processo de eliminação de radicais livres gerados nos tecidos (DE ROSSO & MERCADANTE, 2007; RODRIGUEZ-AMAYA, KIMURA & AMAYA-FARFAN, 2008). Em relação ao teor de carotenoides presente na physalis Ramadan (2011) reportou valores entre 390 a 1460 mg de all-*trans*-β-caroteno por 100 g de fruta fresca; para fins de comparação, o valor médio de carotenoides

para o tomate foi de 158 mg de licopeno por 100 g de fruta fresca e para a cenoura foi de 520 mg de all-*trans*- β -caroteno por 100 g de fruta fresca (RODRIGUEZ-AMAYA, KIMURA & AMAYA-FARFAN, 2008). O resultado obtido por De Rosso & Mercadante (2007) para a *physalis*, utilizando a técnica de extração exaustiva de carotenoides, foi de 80,89 μ g de all-*trans*- β -caroteno por g de fruta fresca. Enquanto Ramadan & Moersel (2004) encontraram 160 μ g de carotenoides totais por g de fruta fresca.

De Rosso & Mercadante (2007) determinaram o conteúdo de carotenoides da *physalis* utilizando a técnica de cromatografia líquida de alta eficiência acoplada ao detector de arranjo de diodos e à espectrometria de massas (HPLC-PDA-MS/MS) e o all-*trans*- β -caroteno foi o carotenoide majoritário, contribuindo com 76,8 % dos carotenoides totais. O all-*trans*- β -caroteno, cuja estrutura química está mostrada na Figura 2, atua como antioxidante devido às suas ligações duplas conjugadas, que são suscetíveis à oxidação sob ação de luz ou oxigênio e sofrem influência da temperatura.

Figura 2. Estrutura do all-*trans*- β -caroteno.



Restrepo, Cortés & Márquez (2009) e Botero (2008) avaliaram a capacidade antioxidante da *physalis* utilizando o radical sintético DPPH (radical 2,2-difenil-1-picrilidrazila), pelo mecanismo de sequestro de radicais através da doação de hidrogênio, e obtiveram valores variando de 192 até 210 μ mol Trolox por 100 g de amostra. Vasco, Ruales & Eldin (2008), por sua vez, obtiveram aproximadamente 70 μ mol Trolox por 100 g de amostra, valor comparável ao obtido para o tomate (80 μ mol Trolox por 100 g de fruta fresca). Rop *et al.* (2012) encontraram valores de capacidade antioxidante variando de 7,05 até 8,90 equivalente de ácido ascórbico para o radical DPPH e de 7,20 até 9,31 equivalente de ácido ascórbico para o radical ABTS.

Restrepo, Cortés & Márquez (2009) e Botero (2008) também avaliaram a concentração de compostos fenólicos totais, usando o reagente de Folin-Ciocalteu, e encontraram aproximadamente 40 mg de ácido gálico por 100 g de amostra; para o ensaio de

poder redutor de ferro (FRAP) encontraram a capacidade antioxidante de aproximadamente 55 mg de ácido ascórbico por 100 g de amostra.

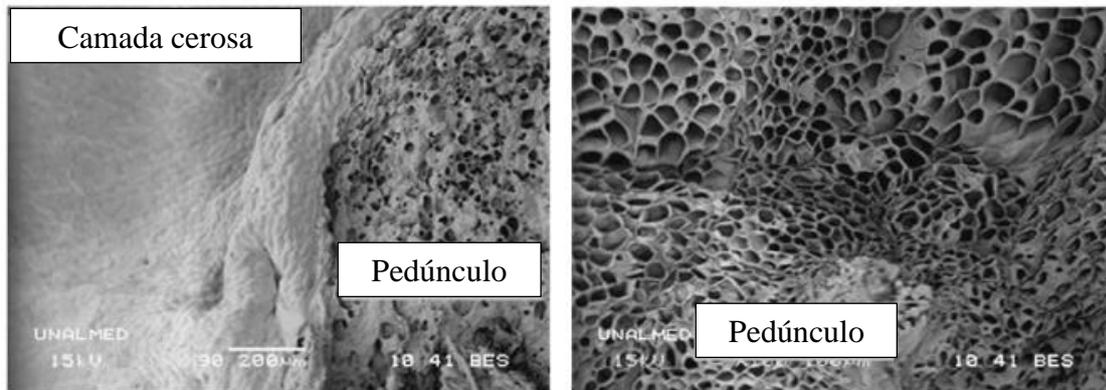
Como conclusão à discussão feita nos parágrafos anteriores, vale ressaltar que o grau de maturação da fruta é um fator importante na quantificação dos compostos bioativos e, desta forma, comparações como às realizadas nos parágrafos anteriores devem ser feitas com cautela para não induzir a conclusões errôneas.

c) Análise Microestrutural

A fruta *Physalis peruviana* L. possui características microestruturais complexas uma vez que o filme ceroso que circunda a superfície da fruta é bastante impermeável, o que pode dificultar o uso de técnicas que melhorariam suas características nutricionais tais como a impregnação de sólidos e/ou compostos bioativos usando vácuo, a desidratação osmótica e a secagem usando ar quente. O pedúnculo - que representa 5 % da superfície total da fruta - corresponde ao ponto de ruptura do cálice, tem uma microestrutura porosa, sendo que é a área mais suscetível para a incorporação de solutos e nutrientes (MARÍN, 2009; RESTREPO, CORTÉS & MÁRQUEZ, 2009; PUENTE *et al.*, 2011).

De acordo com o estudo realizado por Marín (2009), a microestrutura da *physalis* é composta por uma zona de um filme compacto, ceroso e impermeável e por outra zona ao redor do pedúnculo que é porosa, conforme pode ser visualizado na Figura 3. Segundo Puente *et al.* (2011), a superfície da fruta é comumente usada para produzir valor adicional a esta fruta, através da incorporação de compostos fisiologicamente ativos dentro da sua estrutura, usando técnicas como engenharia de matrizes para obtenção de alimentos enriquecidos com compostos bioativos. Esse processo de incorporação de compostos ocorre principalmente através da região do pedúnculo da *physalis*, uma vez que essa é a área que possui a maior porosidade em relação ao restante da superfície da fruta.

Figura 3. Micrografia da *Physalis peruviana* L. obtida por Microscópio Eletrônico de Varredura (Fonte: MARÍN, 2009).



Vásquez-Parra, Ochoa-Martínez & Bustos-Parra (2013) também evidenciaram que o processo de secagem de physalis utilizando ar quente é dificultado devido à casca cerosa da fruta e, por isso, neste trabalho os autores avaliaram o efeito de pré-tratamentos físicos (branqueamento) e químicos (óleo de girassol e carbonato de potássio, K_2CO_3 ; óleo de oliva e carbonato de potássio, K_2CO_3 na temperatura de 28 °C; NaOH e óleo de oliva na temperatura de 96 °C) a fim de aumentar a permeabilidade da casca cerosa da physalis, acelerando o processo de difusão da água durante a secagem.

d) Aspectos socioeconômicos

Embora o crescimento da *Physalis peruviana* L. se estenda por toda a região dos Andes da América do Sul e mesmo tendo sido encontrada por duas décadas em mercados sul-americanos, da Venezuela ao Chile, é na Colômbia onde é cultivada para exportação e foi esse o país que alcançou a liderança como o maior produtor de physalis, seguido pela África do Sul (MAZORRA, 2006; RAMADAN, 2011; PUENTE *et al.*, 2011). Com relação à produção de physalis, os dados mais recentes encontrados na literatura indicam que a Colômbia é o principal produtor com 11.500 toneladas por ano (CASTRO, RODRÍGUEZ & VARGAS, 2008). Sendo que a produção desta fruta está em constante crescimento a fim de satisfazer às crescentes demandas de exportação (classificado em 2º lugar, após, somente, da exportação de banana), principalmente para a Europa, Estados Unidos e Brasil que importam a fruta *in natura* à U\$ 15,00 dólares por kilograma (Kg). Segundo Puente *et al.* (2011), o excedente desse cultivo de frutas, não destinado à exportação, atingiu 50 % da produção total. As maiores dificuldades de exportação das physalis são devido a sua elevada perecibilidade,

demonstrando a importância da industrialização desta fruta, como por exemplo, para a obtenção de produtos desidratados.

Godoy (2011) também destaca que a Colômbia é o principal exportador de physalis do mundo citando, além disso, que no período entre os anos de 2007 e 2008 quase toda physalis consumida pela União Europeia foi comprada da Colômbia. O valor total arrecadado pela Colômbia devido à exportação desta fruta desidratada (através da utilização de ar quente) para países asiáticos (Líbano e Turquia), europeus (principalmente, Suíça, Alemanha, Suécia e Espanha) e norte-americanos (Estados Unidos e Canadá) no período de 2009 a 2010 aumentou de U\$ 521 milhões para U\$ 688 milhões o que representa um crescimento de aproximadamente 32,1 % em relação aos anos anteriores.

Dados socioeconômicos demonstram que o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, com uma área de aproximadamente 2,5 milhões de hectares (Anuário Brasileiro da Fruticultura, 2013). Segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a produção brasileira de frutas atingiu quase 45 milhões de toneladas em 2011, perdendo somente para a China e para a Índia; no entanto, o Brasil aparece em primeiro lugar quanto à produção de frutas tropicais. Outro fator importante a ser destacado é que a área de frutas cultivadas diminuiu aproximadamente 0,5 % em relação ao ano anterior, o que demonstra uma melhora nos índices de produtividade.

Segundo o Instituto Brasileiro de Frutas (2012), o grupo de pequenas frutas, também chamadas de *berries*, possui alto valor agregado, uma vez que apresenta elevado crescimento de produção e consumo no mercado interno. No entanto, sua comercialização ainda é restrita aos grandes centros consumidores, como São Paulo e Rio de Janeiro, devido ao seu alto preço, e por apresentarem elevada perecibilidade. Estima-se que a produção desse grupo de pequenas frutas, incluindo a physalis, contribua, anualmente, com aproximadamente 110.000 toneladas (SANTOS, 2003) e, além disso, encontra-se em constante crescimento.

Atualmente, a fruta physalis tem sido mais difundida no mercado internacional, principalmente, devido ao seu sabor característico e às suas propriedades medicinais que tornam a sua comercialização bastante atrativa (BRIGHENTI, 2008; RAMADAN, 2011). Entretanto, no cenário brasileiro, a produção desta fruta ainda não é significativa e está mais voltada para a pesquisa, principalmente devido à presença de grande quantidade de compostos

bioativos nesta fruta. Desta forma, o cultivo de *physalis* representa uma inovação para a fruticultura brasileira, sendo bastante rentável e apresentando boas perspectivas de mercado, tanto nacional quanto internacional. Os estudos realizados por Muniz *et al.* (2011) mostraram que a produção desta fruta na região sul do país é bastante promissora mesmo utilizando diferentes sistemas de condução de cultivo. Além disso, segundo o Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural Colombiano (2009), até 2008 a hegemonia da Colômbia na produção e comercialização da *physalis in natura* era inquestionável. No entanto, desde 2009, o Brasil e o Chile aparecem como competidores ativos e possuem participação significativa, principalmente devido aos resultados promissores de produção e comercialização desta fruta.

e) Industrialização e comercialização da *physalis*

A *Physalis peruviana* L. possui sabor ácido e doce ao mesmo tempo, podendo ser usada em saladas e na produção de doces em calda (National Research Council - NCR, 1989). Embora as *physalis* sejam geralmente comercializadas na sua forma *in natura*, essas frutas podem ser utilizadas na preparação de molhos, geleias e sorvetes (PUENTE *et al.*, 2011), ou, então, para obtenção de produtos desidratados ou secos, tornando-se uma “*physalis passa*” (semelhante à uva passa), para serem posteriormente utilizados em padarias no preparo de pães ou como cereal no café da manhã (VÁSQUEZ-PARRA, OCHOA-MARTÍNEZ & BUSTOS-PARRA, 2013).

No estudo de Ramadan & Moersel (2007) foi realizado o tratamento enzimático do suco de *physalis*, e verificou-se que o sumo da *Physalis peruviana* L. madura é rico em pectinase, o que promove uma redução de custos no preparo de geleias e similares. Além disso, Erkaya, Dagdemir & Sengul (2012) avaliaram a influência da adição de diferentes concentrações (5, 10 e 15 %) de *physalis* (provenientes da Turquia) secas, usando ar quente, nas propriedades físicas, químicas e sensoriais e conteúdo mineral de sorvetes. O aumento da concentração de *physalis* no sorvete promoveu melhoras em todos os quesitos analisados e os resultados sensoriais indicaram que a adição de *physalis* foi aprovada pelo painel de provadores.

Além de apresentar elevado potencial como fruta fresca, a *physalis* pode ser apreciada como ingrediente de destaque em saladas, pratos cozidos, sobremesas, doces, lanches naturais e conservas de frutas (RAMADAN & MOERSEL, 2003). Sendo assim, o desenvolvimento de

produtos funcionais a partir dos compostos bioativos presentes na *Physalis peruviana* L. representa uma alternativa para aumentar a comercialização desta fruta (PUENTE *et al.*, 2011). Atualmente a indústria de alimentos já utiliza a *Physalis peruviana* L. em diferentes produtos, incluindo sucos, iogurtes e compotas (RAMADAN, 2011). Além disso, Licodiedoff *et al.* (2013) destaca que não existem muitos estudos sobre processos de conservação pós-colheita da physalis, que são fundamentais para preservar a qualidade das frutas e estender sua vida útil.

Segundo Ramadan & Moersel (2009), o rendimento do suco de physalis é 72,6 % do peso fresco da fruta. A quantidade de ácido total no suco de physalis é de aproximadamente 1,0 %, o pH do suco é ácido (em torno de 3,8) e o teor total de açúcar no suco é de 4,9 g por 100 g de suco, sendo este valor composto principalmente por sacarose (35 g por 100 g de açúcar) e frutose (29 g por 100 g de açúcar). O teor total de açúcar no suco de physalis é comparável ao teor de açúcar contido nos sucos comuns, tais como: morango e laranja. El Sheikha *et al.* (2010) estudaram o conteúdo proteico do suco de *Physalis pubescens* L. mostrando aproximadamente 31,8 % de aminoácidos essenciais, principalmente leucina, lisina e isoleucina.

Apesar dessas alternativas de industrialização da physalis, o maior volume de consumo dessas frutas ainda é na sua forma *in natura*. No entanto, um aspecto que dificulta a comercialização da physalis *in natura* é sua alta perecibilidade. Segundo o *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación*, ICONTEC, (1999) é recomendado comercializar a fruta em até 12 horas após a colheita, caso contrário, ela deve ser armazenada em um ambiente a uma temperatura de 4 °C e umidade relativa (UR) de 90 %. Cedeño & Montenegro (2004) demonstraram que a physalis, sem o cálice, pode ser armazenada por até três dias a 18 °C com UR de 70 % e até cinco dias a 6 °C com UR de 70 %. No mesmo estudo, as frutas com cálice armazenadas a 18 °C com UR de 70 % conservaram sua qualidade por 20 dias e as refrigeradas a 6 °C com UR de 70 % por até 30 dias.

Além disso, de acordo com o estudo realizado por Godoy (2011), uma limitação do processo agroindustrial utilizando a physalis como matéria-prima diz respeito ao fato de que ainda não existem muitos estudos sobre as propriedades desta fruta. Outra dificuldade encontrada é devido à falta de estudos indicando quais são as características desta fruta que são modificadas devido aos processos de transformação. Portanto, em função da curta vida

útil da physalis após sua colheita, da presença de grande quantidade de compostos bioativos, e da sua elevada quantidade de água (aproximadamente 90 %) recomenda-se a aplicação de um processo de desidratação como uma alternativa tecnológica para reduzir as perdas pós-colheita desta fruta (CASTRO, RODRÍGUEZ & VARGAS, 2008).

Uma vez apresentados os aspectos relacionados às características da physalis e a importância do seu processamento, passaremos agora para a discussão dos fundamentos teóricos relacionados ao processo de desidratação osmótica, assim como do processo de transferência de massa em sistemas alimentícios.

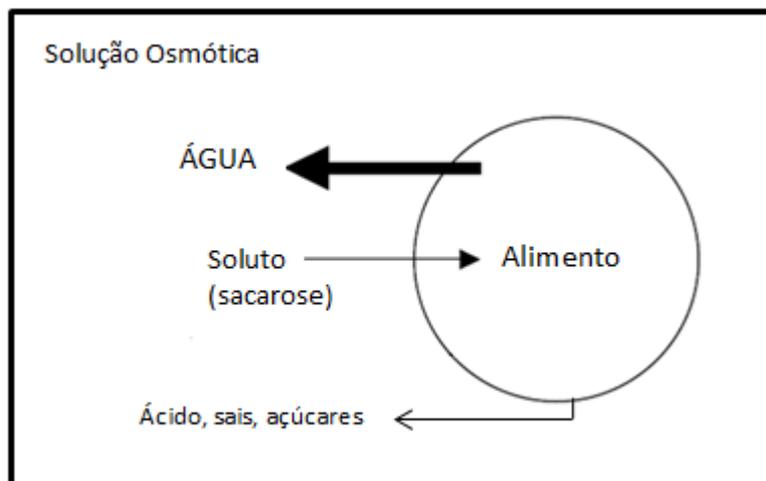
2.2. O Processo de Desidratação Osmótica

O processo de desidratação osmótica promove a remoção parcial de água do alimento pela sua imersão em uma solução concentrada de sólidos solúveis. A diminuição da umidade das frutas contribui para a conservação e o uso prolongado dos mesmos, uma vez que faz com que eles se tornem menos suscetíveis à degradação. No presente trabalho, esta técnica de processamento será aplicada na physalis com o objetivo de reduzir a quantidade de água presente na fruta promovendo, assim, uma redução do requerimento total de energia em processos de secagem subsequentes.

A desidratação osmótica é um processo no qual os alimentos são colocados em contato com soluções concentradas de sólidos solúveis que possuem maior pressão osmótica e menor atividade da água. Esta técnica consiste na remoção parcial da água por imersão do material celular em uma solução hipertônica durante um determinado período de tempo. Durante a desidratação osmótica, a transferência de massa ocorre entre o tecido da planta e a solução osmótica. A complexa estrutura celular dos alimentos pode ser considerada uma membrana semipermeável e a diferença de potencial químico da água entre os alimentos e o meio osmótico é a força motriz para a desidratação. Deste modo, conforme esquematizado na Figura 4, ocorrem dois fluxos de transferência de massa em contracorrente: perda de água do alimento para solução (quantitativamente mais significativa) e transferência de soluto da solução para o alimento. Como a membrana responsável pelo transporte osmótico não é perfeitamente seletiva, outros solutos presentes nas células (vitaminas, minerais, açúcares, ácidos orgânicos) também podem se difundir para a solução osmótica (TORREGGIANI, 1993; RASTOGI & RAGHAVARAO, 2004; RODRIGUES & FERNANDES, 2007;

SCHMIDT, CARCIOFI & LAURINDO, 2009; MERCALI *et al.*, 2011; RODRÍGUEZ *et al.*, 2013).

Figura 4. Transferência de massa em contracorrente decorrente da imersão de um alimento (geometria esférica) em uma solução concentrada de sacarose.



A taxa de perda de água e de incorporação de solutos depende de fatores como a natureza do material (espécie, variedade, grau de maturação, tamanho e formato) e das variáveis do processo (concentração, composição e temperatura da solução osmótica, tempo de contato, nível de agitação da solução, geometria da amostra e razão volumétrica entre a solução osmótica e o alimento). Os principais motivos para a aplicação de tratamento osmótico em frutas são promover a desidratação parcial e a impregnação de soluto nesse alimento. A impregnação de sólidos solúveis (açúcares) aumenta a temperatura de transição vítrea, resultando em uma estrutura mais resistente e, portanto, em produtos finais com uma melhor aparência (SERENO, MOREIRA & MARTÍNEZ, 2001; KAHN *et al.*, 2008).

A desidratação osmótica é um processo que recebeu atenção considerável nos últimos anos, pois utiliza baixas temperaturas e requer pouca energia (RODRIGUES & FERNANDES, 2007; RODRÍGUEZ *et al.*, 2013). O processo de desidratação osmótica é amplamente conhecido como um método de remoção de água eficiente uma vez que a água removida do produto encontra-se no estado líquido, ao invés do estado vapor. Desta forma, ao longo do processo, o conteúdo inicial de água é diminuído, e o tempo total de secagem pode ser reduzido, economizando energia total necessária para a realização do processamento (HERMAN-LARA *et al.*, 2013). No entanto, devem-se levar em consideração outros custos associados ao processo de desidratação osmótica, tais como o aquecimento, a reutilização e a

agitação da solução osmótica. Sendo assim, uma limitação da utilização dessa técnica tem sido minimizar a geração de resíduos, por exemplo, gerando coprodutos. A solução osmótica, se não reutilizada, gera um grande volume de efluente que precisa ser descartado dentro das leis ambientais, sem causar danos ao meio ambiente.

Uma possível alternativa para aproveitar essa solução osmótica é sua reutilização na produção de aguardentes e licores, através de processos de fermentação e destilação. O fermentado, por sua vez, pode ser utilizado para a produção de vinagres finos com sabores e aroma das frutas. Outra possibilidade é o reaproveitamento da calda açucarada para a produção de frutas em calda (GOMES, CEREDA & VILPOUX, 2007).

Moraga, Moraga & Martínez-Navarrete (2011) avaliaram a possibilidade de reutilização de uma solução osmótica de sacarose (concentração de 55 °Brix) no processo de desidratação osmótica de toranjas, com e sem pasteurização prévia. Durante o processamento foi possível observar uma migração parcial de substâncias naturais solúveis presentes na fruta para a solução osmótica. Além disso, foi verificado que é possível reutilizar a solução osmótica em até cinco (5) ciclos sucessivos de desidratação osmótica, sem qualquer tratamento de reconcentração, uma vez que a estabilidade das frutas obtidas, em relação a sua composição, não é afetada pela diluição que ocorre na solução osmótica. No entanto, é recomendável pasteurizar a solução osmótica antes de cada ciclo de desidratação a fim de garantir a qualidade microbiológica das frutas osmoticamente desidratadas. Desta forma, os benefícios da reutilização da solução osmótica podem ser descritos não somente em termos econômicos, mas também em termos de minimização de geração de efluente no final do processamento.

Outro ponto a ser considerado durante o processo de desidratação osmótica é o fluxo mássico de incorporação indesejável de soluto nos produtos alimentícios. A incorporação de grandes quantidades de soluto causa resistência adicional à transferência de água e conduz a uma baixa taxa de desidratação na secagem complementar (MERCALI, 2009). Desta forma, a incorporação de soluto irá depender exclusivamente da aplicação industrial de destino do produto desidratado. Por exemplo, se a fruta osmoticamente desidratada for enviada para a produção de balas, será desejável que ela contenha uma elevada quantidade de açúcar; caso ela seja enviada para auxiliar a produção de alimentos infantis é desejável que ela possua um baixo teor de açúcar incorporado.

Singh *et al.* (2010) destacam que o processo de desidratação osmótica, muitas vezes, pode ser utilizado como um pré-tratamento de alguns processos convencionais, tais como: congelamento, criosecação (*freeze-drying*), secagem a vácuo e secagem utilizando ar quente, a fim de melhorar as propriedades nutricionais, sensoriais e funcionais dos alimentos, reduzir os custos energéticos ou mesmo para desenvolver novos produtos. Além disso, o processamento de frutas via desidratação osmótica é eficiente, sendo capaz de preservar a cor, o sabor e a textura dos alimentos frente ao aquecimento aplicado (FERNANDES, RODRIGUEZ & GASPARETO, 2006; LOMBARD *et al.*, 2008).

A secagem que utiliza ar quente é um processo convencional de desidratação onde ocorre simultaneamente a transferência de calor e massa, acompanhada por mudança de fase, sendo, portanto, um processo de custo elevado. O processo de desidratação osmótica, por sua vez, é reconhecido como um método de desidratação parcial energeticamente econômico, uma vez que não há necessidade de mudança de fase. Assim, um pré-tratamento como o processo de desidratação osmótica pode apresentar, nos períodos iniciais de desidratação, uma taxa mais elevada de perda de água do que a taxa fornecida por processos de secagem convencional, podendo ser usado para a redução do teor inicial de água, redução do tempo total de processamento e do tempo de secagem com a consequente diminuição das perdas de nutrientes pelo calor (RASTOGI & RAGHAVARAO, 2004; RODRIGUES & FERNANDES, 2007).

Outra aplicação importante é a utilização do processo de desidratação osmótica para reduzir a atividade de água dos alimentos; a diminuição da atividade de água dos alimentos inibe o crescimento microbiano e prolonga a vida de prateleira dos produtos (RASTOGI *et al.*, 2002). O principal fator que determina a vida de prateleira de um alimento é a quantidade de água disponível que pode possibilitar o desenvolvimento das atividades microbiológicas, enzimáticas e químicas em alimentos (FELLOWS, 2006). Alimentos com o mesmo conteúdo de água diferem em termos de atividade de água e, conseqüentemente, de perecibilidade. Este fato é atribuído às diferenças de intensidade com a qual a água está associada a constituintes não aquosos do alimento; água fortemente ligada é menos capaz de dar suporte às atividades de degradação, como crescimento de microrganismos e reações químicas hidrolíticas, que a água fracamente ligada (DAMODARAN, PARKIN & FENNENMA, 2010).

A explicação para esta questão é dada pelo conceito de atividade de água (a_w), este termo indica a intensidade com a qual a água associa-se aos constituintes não aquosos (DAMODARAN, PARKIN & FENNEMA, 2010). A atividade de água, também conhecida como pressão de vapor relativa ou umidade relativa da atmosfera que circunda o alimento, é definida como a razão da pressão de vapor da água na amostra e a pressão de vapor saturada da água pura na mesma temperatura, e corresponde ao teor de água não ligada presente no produto (MUJUMDAR, 1995). Desta forma, é possível verificar que o crescimento microbiano e a deterioração química dos alimentos estão intimamente ligados com a atividade de água do alimento e não somente com a quantidade de água presente. Bactérias patogênicas não crescem em atividade de água inferior a 0,85, enquanto que abaixo da atividade de água crítica nenhum microrganismo cresce. Para a maioria dos alimentos esse valor crítico está entre 0,6 e 0,7 (RAHMAN, 2005). A água ligada influencia nas reações que ocorrem nas frutas, afetando sua qualidade, uma vez que a maior parte das reações biológicas ocorre em meios aquosos. Por isso, Cortés, López & Rojano (2012) estudaram o equilíbrio de sorção da água presente na *Physalis peruviana* L. em diferentes temperaturas (25, 35, 50 e 60 °C) e umidade relativa variando entre 10 e 90 %, usando o método gravimétrico estático.

Apesar de ser indesejável, deve-se levar em consideração que o processo de secagem em alimentos pode promover mudanças nos tecidos celulares e alterações na coloração dos produtos devido ao processamento. De acordo com o estudo da transferência de massa durante a desidratação osmótica de fatias de cebola (*Allium cepa*) e fatias de tomate (*Lycopersicon esculentum*), realizado por Tsamoa *et al.* (2005), sugere-se que podem ocorrer modificações estruturais na superfície de troca mássica da amostra durante o processamento. Essas mudanças na estrutura da fruta podem afetar a cinética de desidratação e, por isso, é recomendável a realização de análises microscópicas nos tecidos dos alimentos durante o tratamento osmótico.

A cor é um atributo de importância fundamental no julgamento da qualidade de um alimento, uma vez que a apreciação visual é o primeiro dos sentidos a ser usado. O impacto visual gerado pela cor pode, muitas vezes, se sobrepor ao causado por outros atributos de aparência e odor (LIMA, MÉLO & GUERRA, 2007). Desta forma, a cor dos alimentos, expressa por parâmetros colorimétricos, indica o índice de transformação natural dos alimentos frescos, bem como as possíveis mudanças ocorridas durante o processo industrial (PINHEIRO & VILAS BOAS, 2005). Cenci (2011) descreveram que algumas formas de

processamento em frutas podem promover alterações químicas, físicas e sensoriais, podendo ocasionar o escurecimento e a deterioração da cor em frutas devido à ocorrência de reações enzimáticas e não enzimáticas. Portanto, um aspecto importante e que deve ser levado em consideração durante o processamento de alimentos é a alteração da sua coloração.

Para um melhor entendimento dos fatores que afetam o processo de desidratação osmótica será feita uma revisão sobre os fundamentos teóricos envolvidos nessa operação, descrevendo o fenômeno da transferência de massa em alimentos, a difusão mássica em meios porosos e o conceito de difusividade mássica efetiva. Também serão apresentadas as formulações matemáticas para o cálculo da difusividade mássica efetiva, considerando diferentes modelos de difusão baseados na Segunda Lei da Difusão de Fick.

2.2.1. O fenômeno da difusão mássica

A transferência de massa pode ser definida como a massa em trânsito, resultado da diferença de potencial químico - na maioria das vezes expresso por uma diferença de concentração - e uma espécie em uma mistura ou a migração de uma ou mais espécies químicas em um dado meio, podendo esse ser sólido, líquido ou gasoso.

A difusão - meio de transporte de interesse no presente trabalho - é um processo de transporte que se dá em nível molecular, no qual há o movimento aleatório das moléculas devido à diferença de potenciais químicos das espécies. Esses movimentos aleatórios fazem com que, do ponto de vista macroscópico, o soluto seja transportado das zonas de concentração mais elevada para as zonas de concentração mais baixas. Esse fenômeno ocorre em líquidos e sólidos, assim como em gases. Entretanto, uma vez que a transferência de massa é altamente influenciada pelo espaçamento molecular, a difusão ocorre mais facilmente em gases do que em líquidos e mais facilmente em líquidos do que em sólidos (INCROPERA & DE WITT, 2008).

A equação fenomenológica que governa a difusão de massa é a Lei de Fick, que relaciona o fluxo de massa do componente A através de um componente B (em sistemas binários). A constante de proporcionalidade desta lei é a difusividade mássica, denotada por D_{AB} , é proporcional ao gradiente de concentração de A. Esta constante sendo de interesse especial no presente trabalho será discutida com mais detalhamento a seguir.

2.2.2. Difusividade mássica

A difusividade mássica é definida como o quadrado da distância percorrida pelo soluto por unidade de tempo e seu valor depende do meio específico em que o processo ocorre. Em outras palavras, a difusividade mássica D_{AB} é a medida do número de moléculas A que são capazes de passar entre as moléculas B para eliminar o gradiente de concentração existente.

A difusão através de uma matriz sólida é um fenômeno mais complexo do que a difusão através de um gás ou através de um líquido (SMITH, 2003) e, em sólidos, a difusividade mássica é da ordem de $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; em muitos casos, a difusão ocorre como parte integrante de outros fenômenos e, sendo um processo lento, muitas vezes limita a taxa global de todo o processo.

2.2.3. Difusão mássica em alimentos

Na indústria alimentícia, operações de secagem são exemplos de processos dependentes da difusão; durante o processo de secagem, água é removida na forma de vapor de um alimento sólido ou líquido para uma corrente de gás quente (geralmente ar). Muitas vezes a transferência de massa em alimentos envolve a transferência de um determinado componente de uma fase através de uma interface para uma segunda fase (SMITH, 2003). Entre estes processos pode-se citar a perda e a incorporação de nutrientes no branqueamento de legumes, onde ocorre tanto a difusão para dentro como para fora dos alimentos; na preservação por salga; nas operações de desidratação; na fritura, em que a absorção de óleo e a perda de água ocorrem simultaneamente; e no processo de acidificação, em que o ácido se difunde a partir da solução para o alimento (SCHWARTZBERG & CHAO, 1982).

Em fenômenos de difusão relacionados com a transformação de alimentos, o gradiente de concentração normalmente é dependente do tempo, e a difusão pode ser bem representada pela Segunda Lei de Fick para estado o transiente (VARZAKAS *et al.*, 2005). De acordo com Crank (1975), a Segunda Lei de Fick é utilizada para meios isotrópicos cuja estrutura e propriedades de difusão em qualquer ponto são as mesmas em todas as direções. Soluções analíticas gerais da Segunda Lei de Fick podem ser obtidas para uma grande variedade de condições iniciais e de contorno. Soluções matemáticas são apresentadas sob a forma de uma série de funções erro (adequadas para pequenos tempos de difusão) e como funções

trigonométricas ou funções de Bessel (apropriadas para grandes tempos), dependendo da geometria em questão.

Matrizes alimentícias, independente de serem de origem vegetal ou animal, são complexas, anisotrópicas e possuem diversos componentes. A transferência de massa de um soluto ou de um solvente pode ocorrer através de soluções oclusas que ocupam os poros do tecido, sendo influenciada pelo volume de solução oclusa, pela porosidade e pelo caminho de difusão, conhecido como tortuosidade (VARZAKAS *et al.*, 2005). A transferência de massa também deve ocorrer através de barreiras fisiológicas, como as paredes celulares e as membranas celulares, e, neste caso, essas barreiras fornecem a resistência dominante (TOUPIN & LE MAGUER, 1989; RASTOGI & RAGHAVARAO, 2004; MERCALI, 2009).

Além disso, em materiais celulares, as macromoléculas podem estar quimicamente ligadas à matriz sólida, e as taxas de reação podem ser limitadas pela difusão. Assim, a compreensão destes processos reacionais exige conhecimentos da natureza e das propriedades destes eventos de difusão-dirigida. Muitos estudos experimentais e teóricos sobre a difusão de solutos através de células e materiais biológicos têm sido executados. Embora tenham sido realizados trabalhos consideráveis sobre difusividades de pequenas moléculas, como a glicose e o NaCl, informações sobre difusividade de moléculas maiores, não estão disponíveis (SUTAR & GUPTA, 2007; SINGH, KUMAR & GUPTA, 2007; ULLOA *et al.*, 2009).

2.2.4. Difusividade mássica efetiva

A difusão de fluidos em sólidos porosos é bastante importante nos processos alimentícios, especialmente em processos de secagem e extração sólido-líquido. Em materiais porosos, define-se a difusividade mássica efetiva, sendo esta uma quantidade empírica e não uma propriedade física precisamente determinada. A predição da difusividade mássica efetiva é uma tarefa complexa, mas medições experimentais são possíveis e elas indicam uma dependência com a temperatura, a pressão e a geometria dos poros (SMITH, 2003).

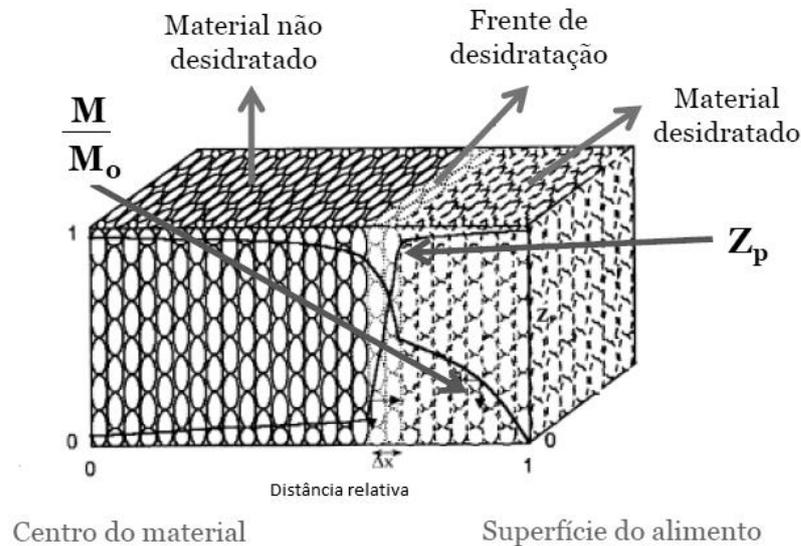
A difusividade mássica efetiva (também conhecida como difusividade mássica aparente) é um modo mais conveniente de descrever o processo de difusão em meios sólidos que possuem uma rede intrínseca de poros e em sistemas heterogêneos química e estruturalmente complexos, onde as espécies difusoras percorrem um caminho tortuoso. Em

sistemas alimentícios porosos, a difusividade mássica efetiva será significativamente menor do que a difusividade mássica devido aos efeitos da tortuosidade. Quanto mais tortuosa for à região percorrida, mais desvios haverá no caminho entre dois pontos de transporte (VARZAKAS *et al.*, 2005).

Nos últimos anos, vários estudos têm sido realizados para melhor compreender os mecanismos envolvidos no processo de transferência de massa a fim de modelar a perda de água e o ganho de sólidos que ocorrem durante a desidratação osmótica de alimentos; de fato, durante o processamento, o estado da membrana celular pode mudar de permeabilidade parcial para permeabilidade total. Em um material homogêneo, assume-se que a taxa de difusão é constante e ocorre devido à influência de um gradiente de umidade uniforme. No entanto, isso não parece ocorrer nos alimentos, sobretudo depois que as fases iniciais do processo terminam e a estrutura física do material começa a mudar com a evolução do processo de desidratação osmótica. Por isso, Rastogi, Angersbach & Knorr (2000) desenvolveram um modelo para explicar as diferenças entre os mecanismos de transferência de água através de um material homogêneo (convencional) e através de materiais biológicos celulares. Esse modelo está baseado na análise da impedância (Z_p) das amostras (obtida através de medidas eletrofísicas), onde o parâmetro Z_p indica a redução relativa de células intactas, variando entre 0 (para o sistema de células intactas) e 1 (para ruptura completa da membrana).

Rastogi, Angersbach & Knorr (2000) evidenciaram que a água presente no alimento é transportada através de três regiões diferentes, tais como: difusão de água a partir do centro do material em direção à frente de desidratação; difusão de água até atingir a frente de desidratação; e difusão de água através do material osmoticamente desidratado para a solução osmótica, conforme esquematizado na Figura 5; nesta figura, M/M_0 representa a razão entre conteúdo de umidade em um tempo t qualquer e o conteúdo de umidade inicial.

Figura 5. Mecanismo para desidratação osmótica em material heterogêneo biológico (adaptado de RASTOGI, ANGERSBACH & KNORR, 2000).



Alguns estudos relacionados às modificações nas propriedades dos alimentos também têm sido realizados a fim de melhor compreender os fenômenos microestruturais que ocorrem nos alimentos durante o processo de desidratação osmótica. Barat, Fito & Chiralt (2001) observaram que as mudanças no volume, na densidade e na porosidade das amostras promoveram um aumento da ação de forças motrizes não difusionais, por exemplo, o gradiente de pressão osmótica. Além disso, verificaram que os parâmetros estruturais, tais como o volume, as dimensões específicas e a porosidade das amostras estão intimamente ligados não apenas ao comportamento do alimento no processo de transferência de massa, mas também com as propriedades físicas e sensoriais da fruta desidratada. Desta forma, os autores ressaltam a importância de estudar o efeito do processo de transferência global de massa, focado na mudança estrutural do tecido da fruta e levando em consideração o encolhimento decorrente do processo de desidratação osmótica.

Segundo Rahman (2001), o processo de transferência de calor e massa em sólidos depende dos valores de densidade e porosidade do meio; Mayor, Moreira & Sereno (2011) estudaram as modificações de volume, densidade, porosidade e dimensões de cilindros de abóbora (comprimento de 25 mm e diâmetro de 15 mm) durante o processo de desidratação osmótica (usando soluções ternárias de sacarose e sal em diferentes temperaturas). Neste estudo, os autores verificaram que a porosidade aumentou com o decorrer do processamento, mostrando um valor mínimo no início do processo de desidratação osmótica. Além disso,

propuseram modelos para avaliar o encolhimento das amostras baseados nas propriedades estudadas, e encontraram que o encolhimento das amostras foi de aproximadamente 27 % em relação ao valor inicial, dependendo das condições experimentais testadas. Além disto, destacaram que o encolhimento dos cilindros de abóbora desidratados osmoticamente foi isotrópico e apresentou comportamento linear com a perda de água e com a redução de massa das amostras, enquanto que o conteúdo de umidade normalizado apresentou um decréscimo não linear. A explicação para este comportamento está relacionada principalmente ao fato de que a variação no volume da fase gasosa no interior do tecido vegetal pode contribuir para aumentar ou diminuir o encolhimento teórico produzido pela remoção de água. Sendo assim, vários fenômenos podem promover um colapso, tais como as forças de capilaridade geradas pela água removida e a perda da turgência das células.

2.2.5. Modelos para prever a concentração de equilíbrio

Quando um produto alimentício é colocado em contato com uma solução hipertônica, um gradiente de pressão osmótica é gerado e, como consequência, inicia-se um processo de transferência de massa onde a água é removida do alimento e migra para a solução e, simultaneamente, o soluto da solução migra para a fruta. Herman-Lara *et al.* (2013) estudaram a modelagem do processo de transferência de massa nos períodos dinâmico e de equilíbrio durante o processo de desidratação osmótica de rabanetes em soluções de NaCl, utilizando um modelo de identificação simultânea que integra a abordagem difusional com a metodologia de superfície de resposta, capaz de reproduzir o comportamento da perda de água e do ganho de solutos como uma função da temperatura, do tempo e da concentração de salmoura.

Segundo Zúñiga & Pedreschi (2012), durante os últimos anos diversos trabalhos de desidratação osmótica em tecidos vegetais têm sido realizados, melhorando o conhecimento sobre os mecanismos de transferência de massa envolvidos. Segundo Barat, Chiralt & Fito, (1998) e Li & Ramaswamy (2010), o processo de desidratação osmótica pode ser caracterizado pela ocorrência de períodos dinâmicos, de pseudo-equilíbrio e equilíbrio. No período dinâmico, as taxas de transferência de massa aumentam ou diminuem até que o período pseudo-equilíbrio seja alcançado. Neste período, ocorre um equilíbrio composicional entre a fase líquida do alimento e a água presente na solução osmótica, podendo ser alcançado em um tempo relativamente curto (comparado com o equilíbrio), aproximadamente 24 a 48

horas dependendo das condições de processo. O período de equilíbrio, por sua vez, é a condição final do processo osmótico, e ocorre quando, tanto o equilíbrio químico quanto o físico (mecânico) são alcançados, sem mudanças na composição ou massa das amostras.

A condição termodinâmica em termos de potencial químico irá determinar o estado de pseudo-equilíbrio, mas a relação entre a composição e o potencial químico ainda não foi completamente estabelecida devido a complexidade dos sistemas e ao comportamento não-ideal das diferentes fases. Entretanto, modelar a cinética do processo osmótico requer dados de composição na superfície do produto (na interface sólido-líquido). Assumindo que o processo não é externamente limitado pela transferência de massa, as concentrações na superfície estariam em equilíbrio com a concentração da solução osmótica, possibilitando a obtenção dos dados no equilíbrio (LI & RAMASWAMY, 2010; ZÚÑIGA & PEDRESCHI, 2012).

Caso o processo de desidratação osmótica seja realizado durante um tempo suficientemente longo, o estado estacionário será alcançado, tanto para a perda de água quanto para o ganho de soluto. Neste caso, a força motriz para a transferência de massa entre o alimento e a solução osmótica torna-se nula e o equilíbrio é atingido (TOGRUL & ISPIR, 2008). Sendo assim, o estudo do equilíbrio desses processos é muito importante para compreender os mecanismos de transferência de massa envolvidos nesse sistema, bem como para empregar a Segunda Lei de Difusão de Fick em sólidos de diferentes geometrias e em estado transiente, permitindo a estimativa da difusividade mássica efetiva da água e dos solutos (ANDRADE *et al.*, 2007; MERCALI *et al.*, 2011; HERMAN-LARA *et al.*, 2013).

A predição do estado de equilíbrio em sistemas alimentícios muitas vezes é difícil de ser executada e torna-se necessária a obtenção desses resultados através de modelos ou artifícios matemáticos (VARZAKAS *et al.*, 2005). O conteúdo de água no equilíbrio, necessário para a aplicação da Segunda Lei de Fick para a difusão, normalmente requer um longo tempo experimental para ser determinado (JENA & DAS, 2005). Além disso, materiais alimentícios tornam-se biologicamente e fisicamente instáveis após longos tempos de exposição em ambientes úmidos, dificultando, ainda mais, a obtenção dos dados de equilíbrio (PELEG, 1988). A seguir estão descritas algumas alternativas matemáticas para a predição da concentração de equilíbrio.

a) **Modelo de Peleg**

Peleg (1988) propôs um modelo com dois parâmetros que descreve curvas de adsorção e testou sua precisão durante a adsorção de água em leite em pó e em grãos de arroz. Essas curvas relacionam o conteúdo de umidade em função do tempo e permitem a estimativa do teor de umidade após longos tempos de exposição a partir de dados experimentais para tempos relativamente curtos. A expressão matemática do Modelo de Peleg é dada pela Equação (1):

$$x_t^w - x_o^w = \frac{-t}{k_1^w - k_2^w \cdot t} \quad (1)$$

Onde x_t^w e x_o^w representam o teor de umidade da amostra no tempo t de desidratação e no início do processamento, respectivamente; k_1^w e k_2^w são os parâmetros do modelo. A constante do modelo k_1^w está relacionada com a taxa inicial de transferência de água, dada pela Equação (2), enquanto que a constante k_2^w está relacionada com a concentração de água no alimento nas condições de equilíbrio, expressa pela Equação (3).

$$\frac{dx^w}{dt} = \left| \frac{1}{k_1^w} \right| \quad (2)$$

$$x_\infty^w = x_o^w - \frac{1}{k_2^w} \quad (3)$$

O modelo de Peleg foi utilizado, por exemplo, para a modelagem da transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica de maçãs (SACCHETTI, GIANOTTI & DALLA ROSA, 2001); também, para estudar a cinética de transferência de massa durante a desidratação osmótica de bananas (MERCALI *et al.*, 2011). Um aspecto importante a ser ressaltado é o fato de que o modelo de Peleg é empírico, ou seja, ele não foi obtido a partir de leis físicas ou teorias de difusão e, portanto, sua aplicabilidade precisa ser testada de forma independente para cada sistema em estudo.

b) Modelo de Azuara

Azuara *et al.* (1992) propuseram um modelo linear cinético de dois parâmetros, baseado no equilíbrio de concentração, que foi usado para estimar o ponto de equilíbrio final. Através desse modelo, a taxa de perda de água em função do tempo pode ser determinada através da Equação (4):

$$WL = \frac{-S_1 \cdot t \cdot (WL_\infty)}{1 + S_1 \cdot t} \quad (4)$$

Onde WL é a fração de perda de água no tempo t , WL_∞ é a fração de água perdida na condição de equilíbrio e S_1 é a constante do modelo relacionada com a taxa de perda de água. Esta equação pode ser linearizada - dando origem a uma reta - o que permite a determinação gráfica dos coeficientes angular e linear que fornecem o valor da umidade de equilíbrio final.

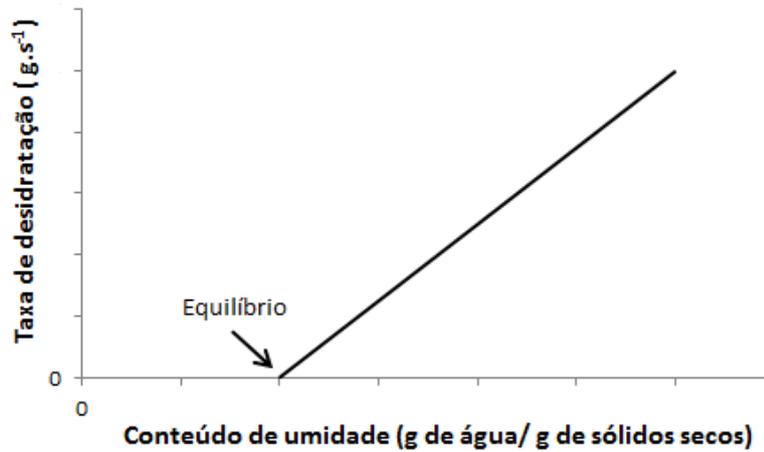
Esse modelo foi capaz de prever perdas de água e ganho de sólidos nas condições de equilíbrio utilizando os dados experimentais obtidos durante um período de tempo relativamente curto em estudos de modelagem da cinética de transferência de massa durante a desidratação osmótica de maçãs e cebolas (SUTAR & GUPTA, 2007). O uso do modelo de Azuara permitiu a obtenção da difusividade mássica em alimentos de diferentes geometrias, relacionando o modelo com a segunda lei de Fick nas coordenadas espaciais apropriadas, como por exemplo, no trabalho de Schmidt, Carciofi & Laurindo (2009) que avaliou a aplicação desse modelo de difusão em cortes de peito de frango. No entanto, esse modelo apresentou dificuldades para modelar experimentos nos quais a difusividade mássica não era constante (RASTOGI, ANGERSBACH & KNORR, 2000).

c) Modelo de Rastogi e Raghavarao

Rastogi & Raghavarao (2004) realizaram a determinação do conteúdo de umidade e do teor de sólidos no equilíbrio através de um método gráfico, adaptando o método tradicionalmente usado para essa determinação do equilíbrio quando o processo de secagem é realizado através da utilização de ar quente. Esse método consiste em plotar a taxa de secagem ($-dx/dt$) versus o conteúdo de umidade em base seca (dx representa a variação do conteúdo de umidade em um determinado intervalo de tempo dt) conforme a representação ilustrada na Figura 6. A determinação do conteúdo de umidade no equilíbrio é obtida

tomando-se o valor lido no eixo das abcissas correspondente à taxa de desidratação nula. Esse mesmo método também foi utilizado por Rastogi & Raghavarao (2004) para a determinação do teor de incorporação de sólidos no equilíbrio.

Figura 6. Variação da taxa de desidratação $(-dx/dt)$ versus o conteúdo de umidade em base seca durante o processo de desidratação osmótica.



2.2.5. Modelagem matemática da desidratação osmótica

A modelação da cinética de transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica tem como objetivo principal a determinação das difusividades mássicas efetivas da água e da sacarose utilizando a solução da Segunda Lei de Fick da difusão para a geometria em questão. O modelo matemático utilizado neste estudo, com base na Segunda Lei de Difusão de Fick para o estado transiente, prevê a quantidade de água que deixa a fruta e a quantidade de soluto (sacarose) que entre na fruta em função do tempo.

A Segunda Lei de Fick para a difusão de massa binária em estado transiente em uma geometria esférica (adequada para a physalis) pode ser escrita como sendo:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{AB} r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D_{AB} \sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{D_{AB}}{\sin^2 \theta} \frac{\partial C}{\partial \phi} \right) \right\} \quad (5)$$

Onde t é o tempo, C é a concentração molar de A, D_{AB} é a difusividade mássica do componente A através do componente B e r , θ e ϕ são as coordenadas espaciais. O termo do lado esquerdo representa o acúmulo de massa e os termos do lado direito da equação representam a difusão nas três direções.

Considerando a difusão apenas radial e assumindo uma difusividade mássica efetiva D_{ef} , a equação a ser utilizada para descrever a transferência de massa é escrita como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2} D_{ef} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right\} \quad (6)$$

As seguintes condições de contorno e condição inicial são válidas:

$$\text{Para } t = 0, C = C_0 \text{ em } 0 < r < R \quad (7)$$

$$\text{Para } t > 0, C = C_1 \text{ em } r = R \quad (8)$$

$$\text{Para } t > 0, \partial C / \partial r = 0 \text{ em } r = 0 \quad (9)$$

No tempo $t = 0$ tem-se um conteúdo de umidade inicial constante C_0 ; na superfície da esfera, em $r = R$, ($C = C_0$) tem-se uma condição de contorno de concentração especificada C_1 ; esta condição é alcançada, pois se assume resistência convectiva externa negligenciável, ou seja, assume-se um elevado coeficiente convectivo de transferência de massa obtido através da manutenção de uma agitação intensa e constante. No centro da esfera ($r = 0$) tem-se a condição de simetria, pois a essa posição corresponde um ponto de máxima concentração.

A utilização da equação governante e suas condições de contorno e condição inicial, descritas acima, para a formulação matemática da desidratação osmótica de *physalis* estudada no presente trabalho é válida com as seguintes hipóteses simplificativas:

- ✓ concentração da solução de sacarose constante ao longo do tempo;
- ✓ os teores iniciais de umidade e açúcares estão distribuídos uniformemente pelo alimento;
- ✓ processo é isotérmico;
- ✓ o produto é representado por uma esfera de raio R constante e é homogêneo;
- ✓ o efeito de encolhimento é considerado insignificante;
- ✓ a parede celular é uma membrana semipermeável hipotética, que permite apenas a permeação de água e sacarose;
- ✓ a difusividade mássica efetiva é considerada constante e homogênea e depende somente das condições do processo de desidratação osmótica.

A resolução analítica da equação diferencial governante expressa pela Equação (6) e suas condições de contorno e condição inicial (Equações 7,8 e 9), já integrada ao longo da direção radial a fim de obter um conteúdo médio de umidade é apresentada por Crank (1975):

$$\frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef}^w \cdot \frac{t}{r^2}\right) \quad (10)$$

Onde X_t representa o conteúdo médio de umidade da physalis (g de água / g sólidos secos) em um determinado tempo de processo, X_o e X_{eq} representam, respectivamente, os teor de umidade de umidade inicial e de equilíbrio, n representa o número de termos do somatório, r representa o raio médio das amostras (m), t representa o tempo de processo (s) e D_{ef}^w representa a difusividade mássica efetiva da água no alimento ($m^2 s^{-1}$).

Assim como para a perda de água, é possível determinar a difusividade mássica efetiva para o ganho de sólidos, onde ocorre a migração dos açúcares para a fruta, a partir da Equação (11) descrita a seguir:

$$\frac{S_t - S_{eq}}{S_o - S_{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef}^{sac} \cdot \frac{t}{r^2}\right) \quad (11)$$

Onde S_t representa o conteúdo médio de açúcares presente na physalis (g de glicose g^{-1} de sólidos secos) em um determinado tempo de processo, S_o e S_{eq} representam, respectivamente, o teor de açúcares inicial e de equilíbrio das amostras e D_{ef}^{sac} representa a difusividade mássica efetiva da sacarose na physalis ($m^2 s^{-1}$).

Alguns pesquisadores calcularam a difusividade mássica efetiva para a água e para os solutos utilizando apenas o primeiro termo da solução analítica obtida a partir da Segunda Lei de Fick (NSONZI & RAMASWAMY, 1998 e VEGA-GÁLVEZ *et al.*, 2012), assumindo que os efeitos dos termos seguintes não são significativos sobre o valor da difusividade; Medina-Vivanco, Sobral & Hubinger (2002), Park, Bin & Brod (2002), Telis, Murari & Yamashita (2004) e Mercali *et al.*, (2011) e Vásquez-Parra, Ochoa-Martínez & Bustos-Parra (2013) calcularam a difusividade mássica através do ajuste dos dados experimentais para os primeiros três a seis termos da equação expandida, usando análise de regressão não-linear. Rodríguez *et al.* (2013) estudaram a cinética de desidratação osmótica de nectarinas *Caldesi* (*Prunus persica* var. *Nectarina*) e a difusividade mássica efetiva foi obtida a partir da solução

analítica da Segunda Lei de Fick aplicada a geometria de uma placa plana e também foi calculada numericamente através do método de elementos finitos levando em consideração a geometria real das amostras de nectarina. Observa-se que a Segunda Lei de Difusão de Fick, no estado não estacionário é a equação mais utilizada para a estimativa da difusividade mássica efetiva da água e dos solutos durante o processo de desidratação osmótica e cuja resolução é fortemente dependente do formato do produto alimentício a ser estudado (RASTOGI *et al.*, 2002).

Conforme já foi descrito anteriormente, alguns autores (MARÍN, 2009; PUENTE *et al.*, 2011 e VÁSQUEZ-PARRA, OCHOA-MARTÍNEZ & BUSTOS-PARRA, 2013) evidenciaram algumas dificuldades que podem ocorrer durante o processo de desidratação osmótica em *Physalis*. Devido à casca da fruta ser cerosa e composta, principalmente, de resinas terpênicas, ou seja, bastante impermeáveis, o processo de desidratação osmótica de *physalis* pode ser dificultado. Foram descritos na literatura algumas alternativas de tratamento realizadas anteriormente ao processo de desidratação osmótica objetivando aumentar a permeabilidade da casca de diversas frutas e as principais características e resultados desses estudos estão descritas a seguir.

No trabalho de Azoubel & Murr (2004), amostras de tomate cereja foram osmoticamente desidratadas em diferentes soluções de NaCl hipertônicas (com e sem sacarose) em duas concentrações diferentes, na temperatura de 25 °C. Como a casca do tomate cereja é cerosa e apresenta uma elevada resistência à transferência de massa, as frutas foram perfuradas com agulhas (1 mm de diâmetro), seguindo estudos prévios realizados por Shi *et al.* (1997), fornecendo uma densidade de furos igual a 16 furos cm⁻². Neste trabalho, a equação de Peleg apresentou o melhor ajuste para os dados de perda de água. A difusividade mássica efetiva determinada para os tomates cereja desidratados pelo processo de desidratação osmótica utilizando a Segunda Lei de Fick aplicada a uma geometria esférica variou entre 0,4 e 1,7x10⁻⁹ m² s⁻¹ para a perda de água e entre 0,04 e 0,5x10⁻⁹ m² s⁻¹ para o ganho de sal. A adição de sacarose a solução osmótica promoveu um decréscimo da força motriz do processo devido à formação de uma camada externa que atua como uma barreira, dificultando a saída de água do alimento para a solução.

Silva *et al.* (2012) avaliaram a perda de água durante o processo de desidratação osmótica de acerola (*Malpighia puniceifolia*). Anteriormente ao processo de desidratação, as

acerolas foram imersas em água fervente por 1 minuto a fim de aumentar a permeabilidade da casca, e, em seguida, foram resfriadas em uma mistura de água e gelo por 1 minuto para remover o excesso de calor. A difusividade mássica foi estimada utilizando os conteúdos médios de umidade e a solução da Segunda Lei de Fick. O processo de desidratação osmótica foi realizado por 12 horas em uma solução de 65 °Brix na temperatura de 27 °C, sem agitação, usando as razões de fruta para solução de 1:4, 1:10 e 1:15. A cinética de secagem do produto foi simulada usando um modelo de difusão, e dois métodos de otimização, Levenberg-Marquardt e o Algoritmo da Evolução Diferencial, para prever a difusividade mássica. Os resultados indicaram que os dois métodos de otimização representaram adequadamente a difusividade mássica efetiva média, que foi calculada para a perda de água, resultando em $1,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. A melhor configuração encontrada neste estudo, ou seja, aquela que apresentou a maior difusividade mássica foi a razão de fruta para solução de 1:10.

Outra forma de maximizar a retirada de água de alimentos é através da aplicação de tecnologias acopladas ou pré-tratamentos ao processo de desidratação osmótica; um exemplo é a utilização do ultrassom. As principais características e os fenômenos envolvidos na utilização desta tecnologia em alimentos estão descritos a seguir.

2.3. Utilização de Ultrassom como Pré-tratamento ao Processo de Desidratação Osmótica

A introdução de novas tecnologias durante o processamento de alimentos pode oferecer vantagens como a redução no tempo total de processo, uma vez que, pode possibilitar que a condição final desejada seja mais rapidamente atingida. Além disso, é importante levar em consideração a necessidade de redução do consumo energético durante o processo, diminuindo assim os custos de produção, sem comprometer a qualidade nutricional e as características naturais dos alimentos (CÁRCEL *et al.*, 2012). Sendo assim, o ultrassom é um exemplo de uma tecnologia emergente que pode ser utilizada para melhorar os processos alimentícios, pois os seus efeitos podem influenciar nos processos de transferência de calor e de massa, acelerando o transporte interno de líquidos para dentro da matriz sólida e/ou facilitando a saída de fluidos de um sólido.

Uma das principais vantagens da utilização de ultrassom é que esse processo pode ser realizado na temperatura ambiente (quando ocorre sob condições controladas, como, por

exemplo, em células encamisadas conectadas a sistemas de refrigeração para manutenção da temperatura constante do alimento), reduzindo, assim, a probabilidade de degradação do alimento devido às altas temperaturas (RODRIGUES & FERNANDES, 2007; NOWACKA *et al.*, 2014). Este cuidado é muito importante uma vez que o uso de temperaturas moderadas é benéfico à conservação de compostos termosensíveis (ESCLAPEZ *et al.*, 2011).

De acordo com Esclapez *et al.* (2011), uma importante pesquisa na área de ultrassom consiste em estudar sua aplicação usando alta frequência e baixa intensidade focada especificamente no monitoramento de produtos ou de processos. Além disso, a utilização de tecnologias emergentes, como o ultrassom, permite modificar as condições originais do alimento, agregando maior valor ao produto final. Segundo Cárcel *et al.* (2012), quando a aplicação do ultrassom ocorre de forma eficiente, a ocorrência de efeitos intensos nas interfaces pode afetar os fenômenos de transferência de massa, reduzindo a espessura da camada limite, promovendo melhoras na cinética de desidratação durante os processos de secagem. Por isso, o uso do ultrassom pode tornar-se interessante em aplicações que envolvam o processo de transferência de calor e massa, uma vez que promove a diminuição tanto da resistência interna quanto da resistência externa ao transporte.

A tecnologia do ultrassom é baseada na utilização de ondas mecânicas, em uma frequência acima do limiar da audição humana (superior a 16 kHz), que viajam através do volume de um material com a velocidade característica da onda e do material onde está se propagando (SORIA & VILLAMIEL, 2010). No processamento de alimentos, o ultrassom é classificado de acordo com a intensidade das ondas ultrassônicas, em ultrassom de baixa intensidade (inferior a 1 W cm^{-2}) e ultrassom de alta intensidade (compreendido na faixa de 10 a 1000 W cm^{-2}). Quando aplicado na faixa de alta intensidade tem como principal objetivo promover mudanças em produtos ou processos; quando aplicado na faixa de 20 a 100 kHz as ondas acústicas podem afetar o meio promovendo efeitos para aplicações industriais (CÁRCEL *et al.*, 2012).

Ondas ultrassônicas podem causar rápidas compressões e expansões alternadas (efeito esponja); as forças envolvidas por este mecanismo mecânico podem ser mais altas do que a tensão superficial que mantém a água dentro dos capilares das frutas criando canais microscópicos que podem facilitar a remoção da água (TARLERTON & WAKEMAN, 1998; FERNANDES, GALLÃO & RODRIGUES, 2008; NOWACKA *et al.*, 2014).

A utilização do ultrassom promove a formação de bolhas que podem crescer e entrar em colapso gerando pontos de alta pressão e temperatura, produzindo, assim, turbulência na zona de cavitação. A intensidade da cavitação e seus efeitos dependem das características do meio líquido, tais como a viscosidade, a tensão superficial e a deformação/degradação da estrutura do alimento, além das variáveis de processo, da intensidade e da frequência ultrassônicas e da pressão envolvida. Esse fenômeno da cavitação, promovido pela utilização do ultrassom, pode ser útil para a remoção da água fortemente ligada. A deformação dos poros de materiais sólidos, tais como frutas, causada pelas ondas ultrassônicas é responsável pela criação de microcanais que reduzem a camada limite de difusão e aumentam a transferência de massa convectiva na fruta (CÁRCEL *et al.*, 2012).

Durante a etapa de compressão a pressão é positiva e na etapa de expansão a pressão é negativa; este ciclo de compressões e expansões gera cavidades e os ciclos periódicos causam o aumento do tamanho das cavidades. Ao atingir um tamanho crítico, a cavidade implode, liberando grande quantidade de calor e pressão em curto período de tempo e em pontos localizados (O'DONNEL *et al.*, 2010). As bolhas de cavitação resultam em correntes de fluxo que, associadas ao gradiente de alta velocidade e de cisalhamento, alteram as características do meio. Outro efeito resultante das bolhas de cavitação é a quebra das moléculas de água (sonólise), gerando moléculas altamente reativas que podem modificar outras moléculas (SORIA & VILLAMIEL, 2010).

Ortuño *et al.* (2010) verificaram que a secagem de cascas de laranja ultrassonicamente promoveu maior compactação da estrutura celular e maiores espaços intercelulares do que a secagem convencional utilizando ar quente. As expansões e compressões alternadas decorrentes da aplicação do ultrassom promoveram a formação de um material altamente poroso, facilitando a movimentação da água. Além disso, a análise microscópica desses alimentos após o processamento permitiu verificar que o efeito do ultrassom foi muito intenso na interface. Em um estudo de secagem realizado por Cárcel *et al.* (2012) para cenouras e cascas de limão foi possível observar um aumento da difusividade mássica efetiva e do coeficiente de transferência de massa convectivo devido à aplicação de ultrassom. No entanto, esse estudo revela que a energia do processo de ultrassom aplicada depende fortemente das características estruturais do material a ser processado. A influência do ultrassom sobre a difusividade mássica efetiva e sobre o coeficiente de transferência de massa convectivo apresentou uma resposta significativa quando a energia aplicada era superior a 30 W no caso

das cenouras, enquanto que para as cascas de limão essa mesma resposta já foi observada em níveis energéticos inferiores a 10 W. Essa diferença pode estar relacionada ao fato das cascas de limão apresentarem uma microestrutura mais porosa do que as cenouras; o efeito da aplicação do ultrassom torna-se mais intenso nas cascas de limão devido a sua resistência mecânica ser mais baixa do que para a cenoura. Além disso, espera-se que ocorra uma maior absorção da energia acústica fornecida pelo ultrassom em produtos de mais alta porosidade, aumentando, deste modo, a energia disponível na partícula, afetando, assim, os processos de transferência de massa.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada para a realização do processo de desidratação osmótica da *Physalis peruviana* L., assim como os equipamentos e os métodos analíticos utilizados. O presente trabalho foi desenvolvido no LATEPA (Laboratório de Tecnologia e Processos em Alimentos) e no LATOR (Laboratório de Tecnologia Orgânica) situados no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

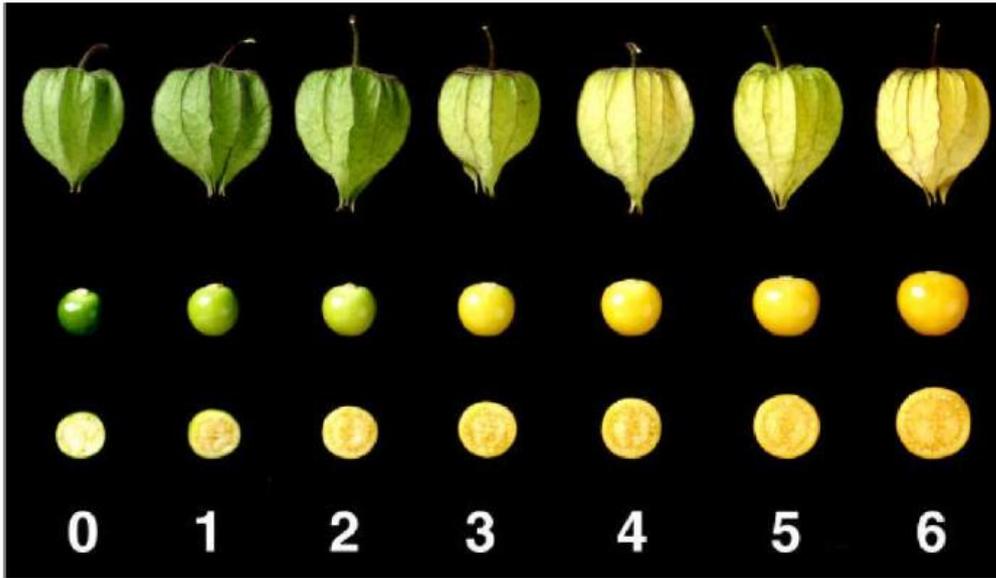
3.1. Matéria-prima e Reagentes

3.1.1. A fruta – *Physalis peruviana* Linnaeus

Para a realização dos experimentos, foram utilizadas physalis da cultivar peruviana, importadas da Colômbia, adquiridas no CEASA - RS (Centro de Abastecimento do Rio Grande do Sul), localizado no município de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Na Figura 7 é apresentada a Escala de Cor da *Physalis peruviana* L., referente ao grau de maturação desta fruta, baseada na Norma Técnica Colombiana NTC 4580 do ICONTEC (1999).

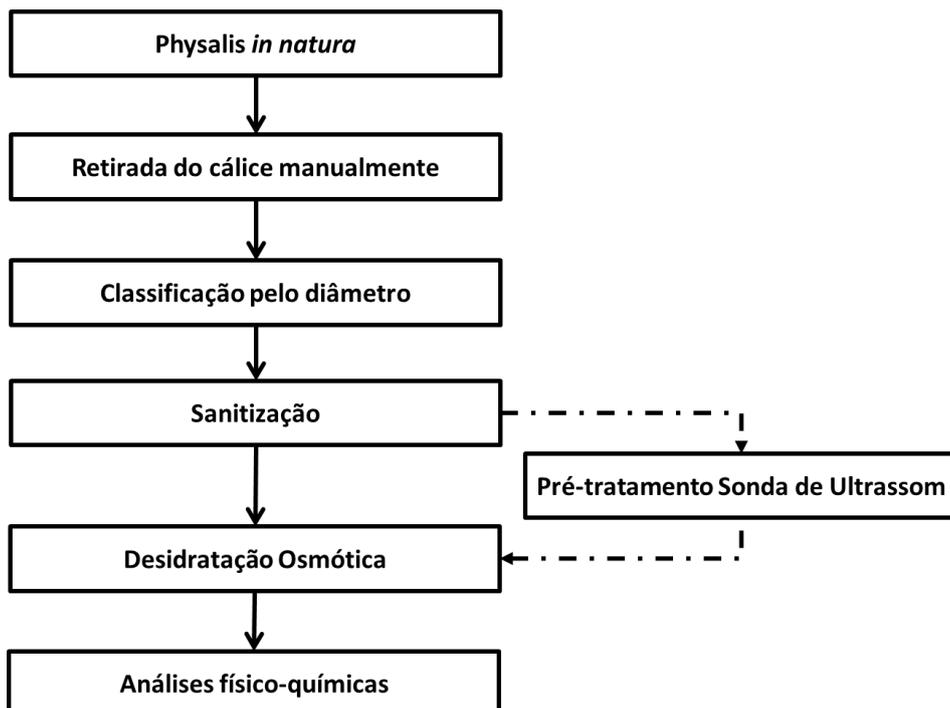
Inicialmente, foi realizada uma pré-seleção das amostras, após elas terem seu cálice retirado manualmente. As physalis selecionadas para a realização dos experimentos não apresentavam danos físicos aparentes, possuíam um teor de sólidos solúveis inicial variando entre 9 e 12 °Brix e grau de maturação variando entre os níveis 4 e 5, segundo a NTC 4580. Além disso, as frutas, de forma esférica, apresentavam diâmetro de $2,0 \pm 0,5$ cm e a massa de $4,6 \pm 1,1$ gramas.

Figura 7. Escala de cor da physalis, baseada na NTC 4580 (ICONTEC, 1999).



Anteriormente ao processo de desidratação osmótica foi realizada uma sanitização das amostras com uma solução de 250 ppm de hipoclorito de sódio durante 10 minutos, conforme ilustrado no fluxograma das etapas envolvidas no processo apresentado na Figura 8. Após a sanitização, as amostras foram colocadas em um cesto a fim de garantir que elas permanecessem totalmente imersas na solução osmótica durante todo o processo.

Figura 8. Fluxograma ilustrativo das etapas envolvidas no preparo das amostras e na parte experimental do processamento via desidratação osmótica.



3.1.2. Solução osmótica de sacarose

A solução osmótica foi preparada com sacarose (marca comercial Caravelas®) e água destilada. Este soluto foi escolhido uma vez que a sacarose é o açúcar presente em maior quantidade na physalis (RAMADAN, 2011), e desta forma, minimiza possíveis mudanças sensoriais que podem ocorrer no processo de desidratação osmótica devido à migração deste açúcar para o produto.

As concentrações foram determinadas de acordo com o planejamento experimental estipulado para o presente trabalho, com base na literatura, e será discutido com mais detalhes a seguir (Tabela 5). As soluções osmóticas foram preparadas sempre no dia anterior à realização do experimento, a fim de garantir que todo o açúcar já estivesse totalmente dissolvido no início do experimento. Adicionalmente, foram realizadas medidas de concentração da solução osmótica em °Brix (g de soluto por 100 g de solução) em um refratômetro ao longo do experimento.

A razão entre a amostra e a solução osmótica utilizada foi de aproximadamente 1:20 (m/m) a fim de evitar a diluição do meio e, como consequência promover uma diminuição da força motriz durante o processo. O volume de solução osmótica utilizado durante cada um dos tratamentos foi de aproximadamente 15 litros.

3.2. Processo de Desidratação Osmótica

O processo de desidratação osmótica foi realizado em um tanque de acrílico encamisado conectado a um banho termostático a fim de garantir que a temperatura fosse mantida constante durante todo o processamento. A representação esquemática do aparato experimental está apresentada na Figura 9. A Figura 10 apresenta uma fotografia dos equipamentos utilizados para a realização dos processos de desidratação osmótica. O sistema montado apresentou agitação mecânica vigorosa e constante (1800 rpm) a fim de garantir que a condição de contorno de concentração especificada na superfície fosse satisfeita (Agitador Mecânico FISATOM modelo 713, número de série 1084910, com impelidor tipo hélice). Foram utilizadas diferentes temperaturas e concentrações da solução osmótica e o planejamento experimental utilizado está mostrado na Tabela 5. O planejamento experimental foi realizado em duplicata.

Figura 9. Representação esquemática do aparato experimental montado para a realização do processo de desidratação osmótica.

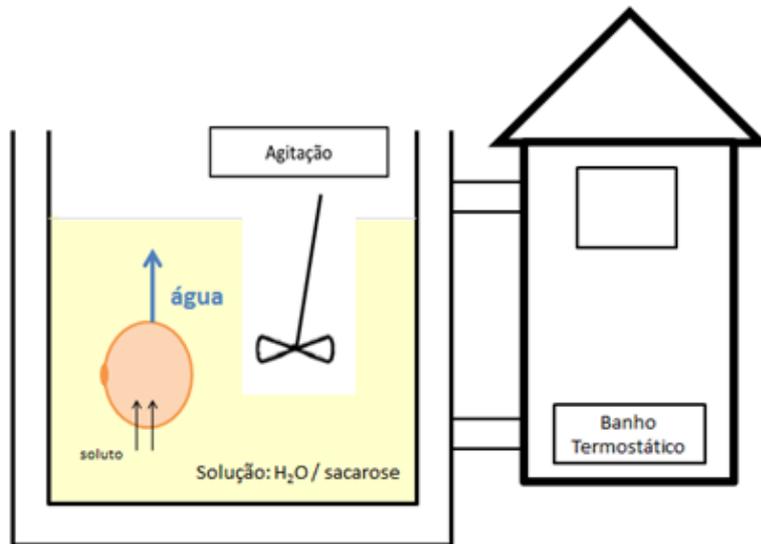


Figura 10. Aparato experimental utilizado para a realização dos experimentos de desidratação osmótica de physalis.

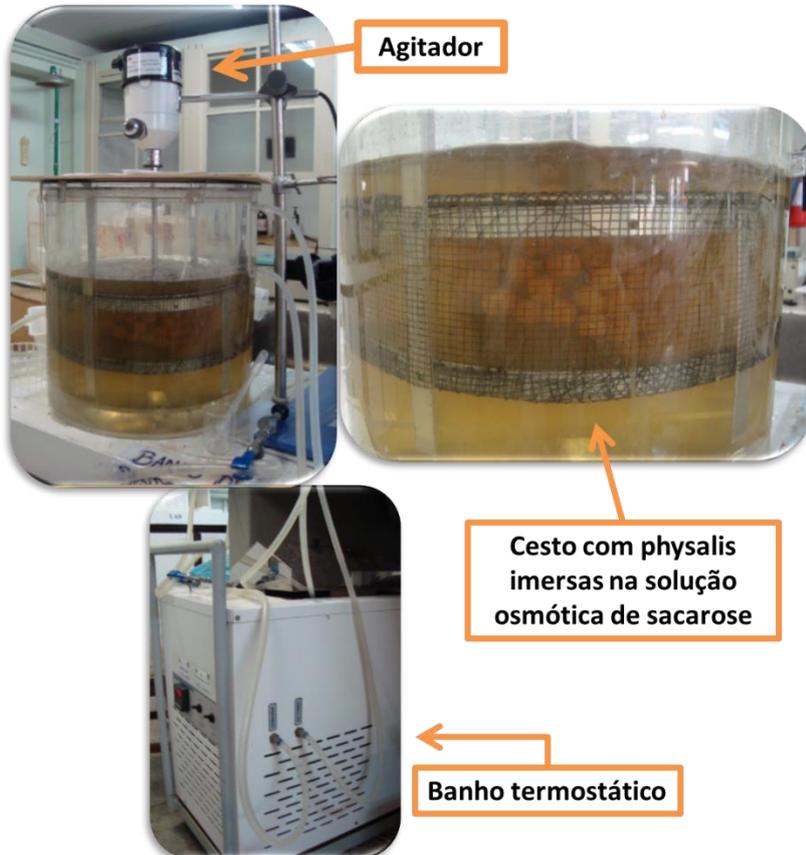


Tabela 5. Planejamento Experimental 2^2 com repetições no ponto central realizado em duplicata.

Tratamento	x_1	x_2	Temperatura da solução (°C)	Concentração de Sacarose (°Brix)
1	-1	-1	40	40
2	+1	+1	70	70
3	-1	+1	40	70
4	+1	-1	70	40
5	0	0	55	55
6	0	0	55	55
7	0	0	55	55

O processo de desidratação osmótica foi realizado em um período de 0 a 10 horas sob condições de processo constantes para todos os experimentos. Nos testes preliminares realizados as physalis apresentaram resistência ao processo de desidratação e, por isso tempos de processo inferiores não promoveram uma desidratação considerável (os resultados dessas análises preliminares não foram apresentados). Amostras foram retiradas da solução osmótica em tempos de 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8 e 10 horas, enxaguadas com água destilada e secas com papel toalha para remoção da solução osmótica aderida. Em seguida, as physalis foram trituradas em um miniprocessador AROMA (modelo ACP-567), a fim de obter uma amostra mais homogênea.

3.3. Pré-tratamento utilizando Sonda de Ultrassom

Além da realização do planejamento experimental, descrito anteriormente no item 3.2, foram realizados testes com a utilização de um pré-tratamento com sonda de ultrassom (Sonics Vibracell modelo VC750, diâmetro igual a 1,2 cm e potência de 750 Watts, Newtown, USA), no qual as amostras de physalis permaneceram imersas na solução osmótica (55 °Brix) durante 30 minutos, anteriormente ao processo de desidratação osmótica. A frequência da sonda de ultrassom, apresentada na Figura 11, é fixa de 20 kHz e foi usada na amplitude de 80 %. A intensidade do ultrassom aplicado foi de 632 W cm^{-2} , sendo, portanto classificado como ultrassom de alta intensidade. Este experimento foi realizado em triplicata

na condição com e sem o uso da sonda de ultrassom. A razão de fruta e solução osmótica utilizada durante o pré-tratamento foi de 1:3.

Figura 11. Fotografia da sonda de ultrassom utilizada.



A condição experimental escolhida para verificar o efeito da utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica em physalis foi àquela correspondente ao ponto central (temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix). Isto porque, nesta condição experimental, foram realizados 6 (seis) experimentos (números 6, 7, 8, 11, 14 e 19, descritos na Tabela 5), sem a utilização de pré-tratamento e, portanto, o comportamento dos parâmetros de interesse (perda de água, difusividade mássica efetiva da água, ganho de sólidos, incorporação de açúcares, conteúdo de carotenoides, diferença global de cor e atividade de água), permitiria avaliar mais facilmente o efeito da utilização do ultrassom através da comparação dos resultados experimentais obtidos com e sem o uso de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica de physalis.

3.4. Análises Físico-Químicas

Para todos os experimentos foram realizadas análises de umidade, de sólidos solúveis, teor de açúcar, conteúdo de carotenoides, atividade de água e cor. A metodologia e os detalhes dessas análises são descritos a seguir.

3.4.1. Determinação do grau de maturação

O grau de maturação da *physalis in natura* foi determinado visualmente através da Escala de Cor baseada na NTC 4580 (Figura 7) e também pela determinação de sólidos solúveis. O líquido proveniente da trituração das amostras foi avaliado utilizando um refratômetro Carl Zeiss Mod.32-G e a leitura corrigida para 20 °C (AOAC, n° 932.12, 2002). O valor do Brix em graus é a correspondência entre o índice de refração e a porcentagem de açúcares em soluções aquosas a 20 °C. Segundo Carvalho, Mantovani & Carvalho (1990), na prática, usa-se a leitura refratométrica direta para indicar os sólidos solúveis.

3.4.2. Determinação do conteúdo de umidade

A determinação do conteúdo de umidade foi realizada através do método gravimétrico (AOAC 930.04, 1990). Este método consiste em pesar, em balança analítica (marca MARTE, modelo AY220, Brasil), aproximadamente 10 g de amostra em uma cápsula contendo um bastão de vidro e, aproximadamente, 10 g de areia previamente tratada. A utilização da areia é necessária devido ao conteúdo de açúcares presente na *physalis*, uma vez que, a utilização de temperaturas elevadas, promove a caramelização dos açúcares e a consequente formação de uma crosta superficial que impediria a saída de água do alimento. Assim, a utilização de areia evita a formação dessa crosta e promove a formação de poros, o que facilita a retirada de água da amostra. Após a pesagem, a amostra misturada com a areia foi colocada em estufa (marca DeLeo modelo A3 DG Temp, Brasil) na temperatura de 105 °C até atingir peso constante. Este procedimento foi realizado em triplicata para todos os pontos experimentais analisados.

Através da diferença de massa antes e depois da secagem foi medido o teor de umidade da amostra em base seca, (x^w), de acordo com a Equação (12):

$$x^w = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (12)$$

Onde M é a massa da amostra úmida e M_s é a massa da amostra seca.

Posteriormente, realizou-se o cálculo da perda de água (WL) durante o processo de desidratação osmótica, expresso em %, de acordo com a Equação (13):

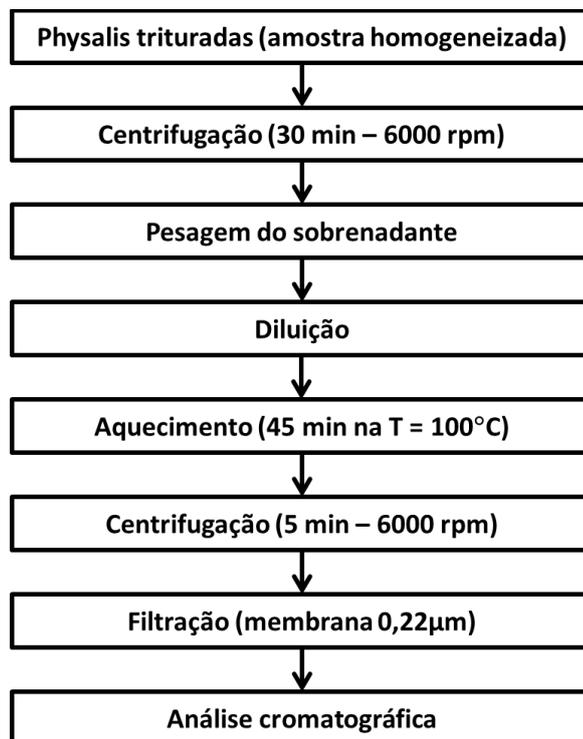
$$WL = \left(\frac{x_o - x_t}{x_o} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

Onde x_o representa a quantidade de umidade inicialmente presente nas amostras de physalis e x_t a quantidade de umidade presente em um tempo t qualquer do processo.

3.4.3. Determinação do teor de açúcares

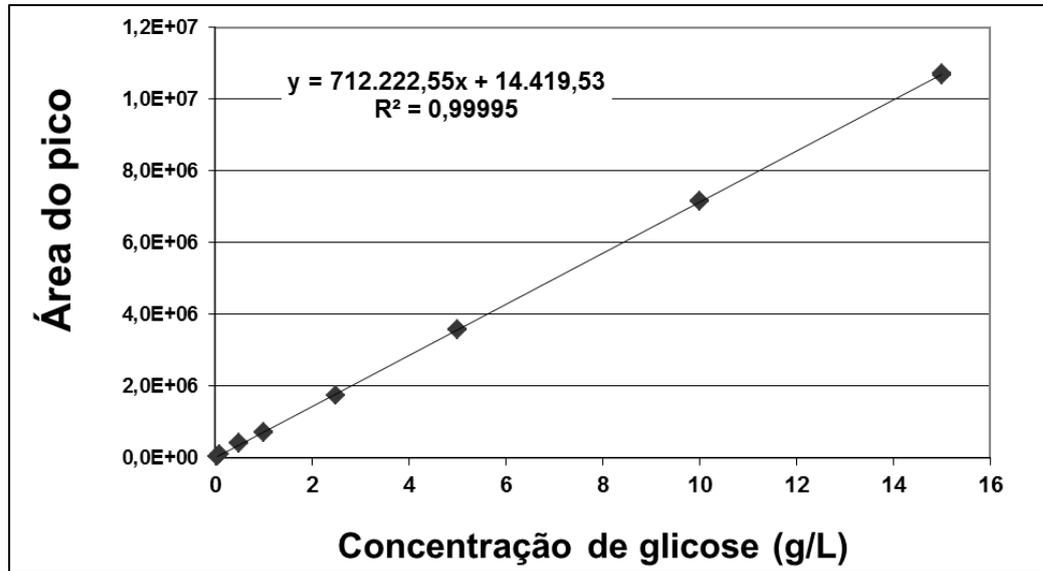
A extração dos açúcares presentes nas amostras foi realizada segundo o fluxograma apresentado na Figura 12. As amostras, previamente trituradas, foram descongeladas e centrifugadas (Centrífuga Refrigerada, modelo CT-5000R, Brasil) durante 30 minutos, na velocidade de 6000 rpm a fim de promover a separação da polpa e do suco. O sobrenadante separado pelo processo de centrifugação foi pesado (aproximadamente 2,5 g) em tubos de centrífuga de 50 mL com auxílio de uma balança analítica (marca SHIMADZU, modelo AY220). Em seguida, foram adicionados 25 mL de água, os tubos foram agitados e homogeneizados em um vórtex; em seguida, eles foram colocados em um Banho Maria na temperatura de 100 °C por 45 minutos. Após as amostras passarem pelo banho de aquecimento, elas foram resfriadas em um banho de gelo, avolumadas em balão volumétrico de 25 mL, centrifugadas (6000 rpm) por 10 minutos e filtradas em uma membrana GV de 0,22 µm de tamanho de poro nominal (durapore, em PVDF, 47 mm de diâmetro, hidrofílica, branca). Este procedimento foi realizado em triplicata para cada amostra. As amostras prontas para análise cromatográfica foram colocadas em ependorf e congeladas (-40 °C) até a realização da injeção no HPLC, para essa análise utilizou-se uma coluna de detecção de monossacarídeos.

Figura 12. Fluxograma das etapas realizadas para o preparo das amostras para análise em HPLC.



A quantificação do teor de açúcares (expresso em g de glicose por g de amostra) foi realizada a partir da determinação do teor dos monossacarídeos glicose e frutose por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). Um cromatógrafo PerkinElmer (Shelton, Connecticut, USA) modelo Series 200 acoplado a um detector de índice de refração, também PerkinElmer (Shelton, Connecticut, USA) modelo Series 200, foi utilizado. A separação dos monossacarídeos foi realizada em coluna Rezex RHM Monossacaride com pré-coluna Holder KJO-4282, ambas da marca Phenomenex (Torrance, USA). Na fase móvel utilizou-se água Mili-Q com fluxo de $0,5 \text{ mL min}^{-1}$ e a temperatura da coluna de $80 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo de retenção da glicose foi de 12,3 minutos e o da frutose foi de 13,2 minutos. Para a quantificação dos açúcares foi feita uma curva de calibração, usando glicose como padrão, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13. Curva de calibração para a determinação de açúcares em HPLC.



3.5. Modelo matemático

A modelagem cinética da transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica foi realizada conforme descrito no Capítulo 2. A determinação do conteúdo de umidade no equilíbrio (X_{eq}) em g de água por g de sólidos secos foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Rastogi & Raghavarao (2004). Enquanto que a determinação da difusividade mássica efetiva tanto da água quanto da sacarose foi realizada utilizando a solução da Segunda Lei de Fick da difusão para sistemas esféricos, levando em consideração os cinco primeiros termos do somatório. A equação expandida utilizada para a determinação da difusividade mássica efetiva da água é dada por:

$$\frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \left(\exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot D_{ef}^w \cdot t}{r^2}\right) + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{-4\pi^2 \cdot D_{ef}^w \cdot t}{r^2}\right) + \frac{1}{9} \exp\left(\frac{-9\pi^2 \cdot D_{ef}^w \cdot t}{r^2}\right) + \frac{1}{16} \exp\left(\frac{-16\pi^2 \cdot D_{ef}^w \cdot t}{r^2}\right) \right) \quad (14)$$

Nesta equação, X_t representa o conteúdo médio de umidade da physalis (g de água por g de sólidos secos) em um determinado tempo de processo, X_o e X_{eq} representam, respectivamente, o teor de umidade inicial das amostras (*in natura*) e o conteúdo de água presente quando o sistema atinge a condição de equilíbrio, r representa o raio médio das amostras (m), t representa o tempo de processo (s) e D_{ef}^w representa a difusividade mássica da água na physalis ($m^2 s^{-1}$). A fim de calcular a difusividade mássica efetiva foi utilizado o

número adimensional de Fourier ($Fo = D_{ef} \cdot t / r^2$) de tal forma que é possível avaliar X_t como sendo:

$$\frac{X_t - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \left(\exp(-\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{4} \exp(-4\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{9} \exp(-9\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{16} \exp(-16\pi^2 \cdot Fo) \right) \quad (15)$$

Da mesma forma, a determinação do conteúdo de açúcares no equilíbrio (S_{eq}) em g de glicose por g de amostra foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Rastogi & Raghavarao (2004) e a difusividade mássica efetiva calculada para a incorporação de açúcares foi determinada pela Equação (16), descrita a seguir:

$$\frac{S_t - S_{eq}}{S_o - S_{eq}} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \left(\exp(-\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{4} \exp(-4\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{9} \exp(-9\pi^2 \cdot Fo) + \frac{1}{16} \exp(-16\pi^2 \cdot Fo) \right) \quad (16)$$

Nesta equação, S_t representa o conteúdo médio de açúcares presente na physalis (g de glicose por g de sólidos secos) em um determinado tempo de processo, S_o e S_{eq} representam, respectivamente, o teor de açúcar inicial das amostras (*in natura*) e o conteúdo de açúcar presente no equilíbrio. No caso da incorporação de açúcares, o número de Fourier (Fo) é baseado na difusividade mássica da sacarose na physalis. Tanto para a perda de água da physalis para a solução osmótica, quanto para a incorporação de açúcar pela fruta, os valores do número de Fourier foram calculados de acordo com a metodologia adotada por Rastogi & Raghavarao (1997) e Mercali *et al.* (2011), utilizando o solver do Excel, através da análise de regressão não linear. O gráfico do Número de Fourier versus o tempo de imersão origina uma reta, cujo coeficiente angular permite estimar a difusividade mássica efetiva multiplicando o valor obtido pelo raio das amostras ao quadrado.

3.6. Determinação do conteúdo de carotenoides totais

A análise de carotenoides para as amostras de physalis foi realizada somente para os tempos inicial (physalis *in natura*) e final (após 10 h de processo). O método de análise de carotenoides foi baseado no procedimento descrito por Rodriguez-Amaya (2010), com algumas modificações. As amostras, previamente trituradas, foram descongeladas e pesou-se aproximadamente 1,0 g de amostra. A extração exaustiva das amostras foi realizada usando gral e pistilo, com o auxílio de celite e acetona como solvente. Posteriormente, foi realizada a partição em funil de separação e o extrato foi diluído em éter de petróleo. Esse procedimento foi realizado em triplicata para cada amostra.

A quantificação dos carotenoides totais foi realizada em Espectrofotômetro Shimadzu® Modelo UV-Visível 1800 utilizando a Equação (17) apresentada a seguir. A leitura do extrato foi realizada em $\lambda = 450$ nm, pois o all-*trans*- β -caroteno é o carotenoide presente majoritariamente na physalis (DE ROSSO & MERCADANTE, 2007), obtida através do espectro de absorção UV - Visível. Todos os valores foram calculados em base seca.

$$\frac{\mu\text{g de carotenoides totais}}{\text{g de amostra}} = \frac{\text{Absorbância } (\lambda = 450\text{nm}) * \text{vol de solução (mL)} * 10^4}{A_{1\text{cm}}^{1\%} * \text{massa da amostra (g)}} \quad (17)$$

O valor de $A_{1\text{cm}}^{1\%}$ representa o coeficiente de absorção do carotenoide em estudo, no solvente utilizado. Neste caso, deve ser usado o valor de 2592, que é o coeficiente de absorção do all-*trans*- β -caroteno no éter de petróleo (RODRIGUEZ-AMAYA, 2010).

3.7. Determinação da atividade de água

Os valores experimentais de atividade de água foram obtidos através de leitura direta em um medidor higrométrico eletrônico (Aqualab 3TE – Decagon, Pullman, USA) método AOAC n° 978.18, 1990. As medições foram realizadas em duplicata para as amostras de physalis *in natura* e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para todos os experimentos realizados.

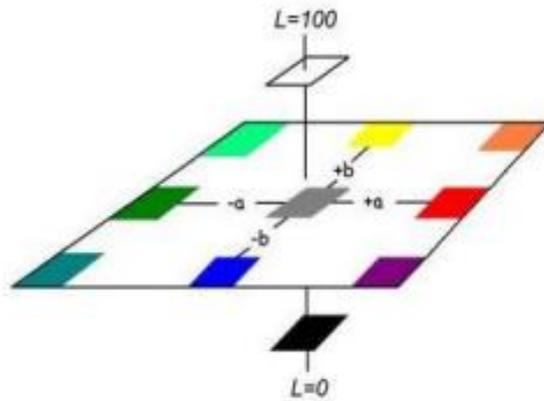
3.8. Análise colorimétrica

As leituras colorimétricas das amostras *in natura* e após 10 horas de desidratação osmótica, previamente trituradas com auxílio de um Miniprocessador AROMA, foram feitas em um colorímetro (Minolta, modelo CR 400, Konica Minolta Sensing, Japão) usando o espaço de cor CIELAB com D_{65} como iluminante e ângulo de observação de 10° (CIE, 1978). A partir do espectro de refletância da amostra, obteve-se os parâmetros colorimétricos L^* , a^* e b^* da escala CIELAB determinados pela *Comission International de l'Eclairage* (CIE) (AGUILERA, 1997).

A coordenada L^* é uma medida de luminosidade, com valores variando de 0 (totalmente preta) a 100 (totalmente branca). A coordenada de cromaticidade a^* pode assumir valores negativos (cor verde) a valores positivos (cor vermelha) e a coordenada de cromaticidade b^* pode variar de valores negativos (cor azul) a positivos (cor amarela).

O diagrama de cores do sistema CIELAB está apresentado na Figura 14. Esses parâmetros são coordenados em diagrama tridimensional, onde o encontro dos três eixos sobre um ponto do diagrama define uma cor específica.

Figura 14. Diagrama representativo do sistema de cores CIELAB (Fonte: MINOLTA, 1994).



A diferença de cor das amostras de *physalis in natura* e após 10 horas de processo via desidratação osmótica é determinada pelo parâmetro ΔE^* , que é calculado pela distância Euclidiana entre dois pontos em um espaço tridimensional definidos pelos parâmetros L^* , a^* e b^* . Matematicamente, o parâmetro colorimétrico ΔE^* pode ser descrito pela Equação (18), descrita a seguir:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (18)$$

Uma cor em qualquer um dos planos a^* e b^* também pode ser descrita em termos de cromaticidade ou Chroma (C_{ab}^*) e do seu ângulo de tonalidade, h_{ab} , o qual é medido em graus numa escala de 0° a 360° . O valor de Chroma (C_{ab}^*) e o h_{ab} (ângulo de tonalidade) podem ser determinados a partir das equações (19), (20), (21) e (22) descritas a seguir (CIE, 1978):

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (19)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ quando } a^* \text{ e } b^* \text{ são positivos} \quad (20)$$

$$h_{ab} = 180 + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ se } a^* \text{ e } b^* \text{ negativos e se } a^* \text{ negativo e } b^* \text{ positivo} \quad (21)$$

$$h_{ab} = 360 + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \text{ } a^* \text{ positivo e } b^* \text{ negativo} \quad (22)$$

Os valores encontrados para os parâmetros de análise de cor correspondem à média de três determinações.

3.9. Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento versátil e muito utilizado para realizar a varredura da superfície da amostra, baseado no emprego de um feixe de elétrons da ordem de keV de energia (Potter & Love, 1999). A técnica MEV foi empregada a fim de verificar possíveis mudanças estruturais da fruta decorrentes do tratamento osmótico. Para tanto foram realizados cortes transversais e “pedaços” das amostras de physalis foram colocados em stubs de 1 cm de diâmetro usando uma fita metálica dupla face de carbono. Posteriormente, as amostras foram examinadas em diferentes escalas de aproximação em um microscópio eletrônico de varredura de bancada (marca Hitachi, modelo TM 3000, Alemanha), utilizando uma aceleração potencial de 5 keV durante as micrografias.

3.10. Viscosidade da solução osmótica

A viscosidade é uma propriedade dinâmica do fluido dependente da temperatura, esta grandeza física está relacionada à resistência ao movimento desse fluido. A viscosidade das soluções osmóticas foi determinada utilizando um viscosímetro de Ostwald imerso em um banho termostático, a fim de garantir que a solução estivesse na temperatura de análise desejada. Neste equipamento são realizadas medições de tempo de escoamento entre meniscos, automaticamente, e faz-se uma comparação com o valor do tempo de escoamento obtido para a água, nas mesmas condições operacionais nas quais foram medidas as soluções osmóticas, uma vez que os valores de viscosidade da água, em diferentes temperaturas, são previamente conhecidos e tabelados.

3.11. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Excel da Microsoft para determinação da variância das amostras e para comparação de médias (testes F e t, respectivamente). Além disso, para a análise estatística dos dados do planejamento experimental foi utilizado o software STATISTICA versão 8.0 (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

Inicialmente, foi observada a significância da regressão pelo teste F (95 % de confiança) e pelo coeficiente de determinação (R^2). Em seguida, foi realizada a análise de

variância (ANOVA) a fim de testar a significância do modelo para cada parâmetro. Os parâmetros temperatura e concentração da solução osmótica foram avaliados em relação à perda de água e ao ganho de solutos no final do processo de desidratação osmótica, e também em relação ao conteúdo de carotenoides totais devido ao processamento após 10 horas pelas amostras de *physalis*. Foram calculados os efeitos dos fatores lineares e da interação sobre a variável de resposta, assim como o erro e a significância estatística (valor p). O valor do coeficiente p está relacionado com o nível de significância da variável independente sobre a resposta em estudo, sendo que foi escolhido o intervalo de confiança de 95 %. Sendo assim, pode-se afirmar que para valores de p inferiores a 0,05 a variável é considerada estatisticamente significativa. Caso contrário, a variável não é considerada estatisticamente significativa.

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a transferência de massa (água e sacarose) durante a desidratação osmótica da *Physalis peruviana* L. O processo osmótico foi estudado em relação à perda de água e à incorporação de açúcar. Outros parâmetros avaliados foram o teor de carotenoides, a cor e a atividade de água para a physalis *in natura* e para as amostras de physalis no final de cada tratamento. Além disso, medidas de viscosidade e atividade de água foram realizadas em todas as soluções osmóticas utilizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

4.1. Matéria-prima

Na Tabela 6 são apresentados os resultados médios do conteúdo de umidade e conteúdo de açúcares presentes na physalis calculado a partir do resultado dos 18 experimentos de caracterização da *Physalis peruviana* L. *in natura* realizados de acordo com a metodologia descrita anteriormente no Capítulo 3.

Tabela 6. Caracterização da *Physalis peruviana* L. *in natura*.

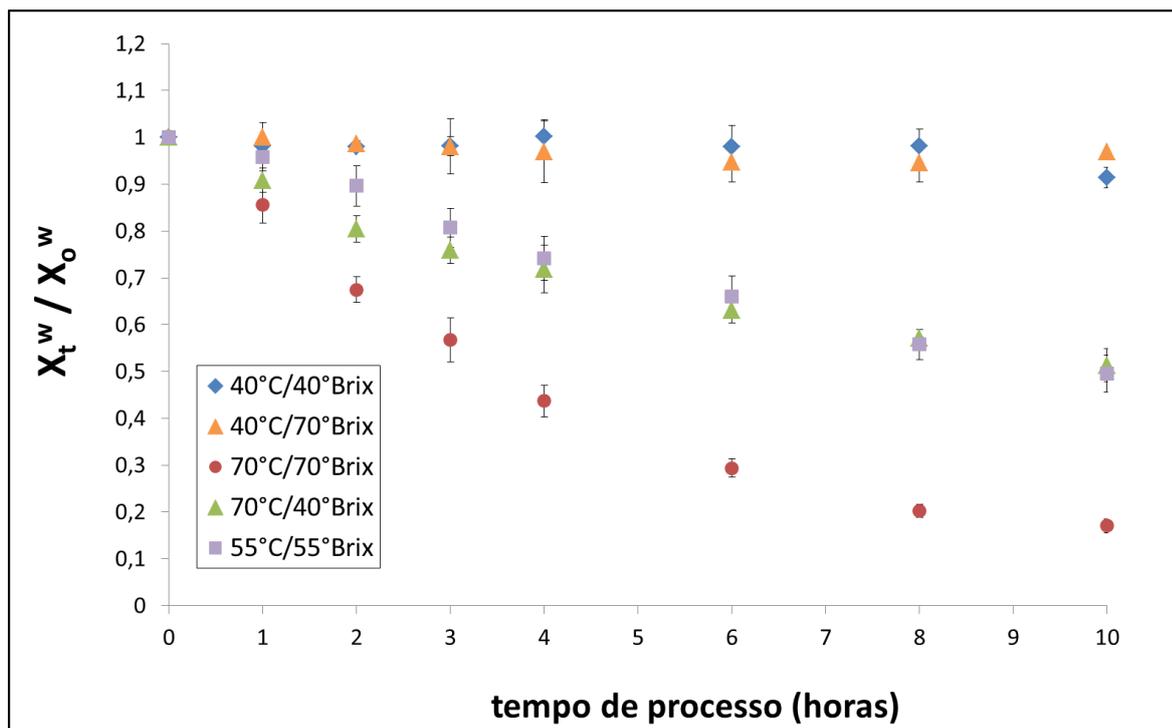
Análise	Média ± desvio padrão
Umidade (% , base úmida)	81,86 ± 1,11
Umidade (g de água por g de sólidos secos)	4,54 ± 0,31
Atividade de água	0,980 ± 0,005
Teor de açúcares (g de glicose por g de amostra)	0,098 ± 0,005
Teor de açúcares (g de glicose por g de sólidos secos)	0,54 ± 0,03
Sólidos solúveis totais (°Brix)	12,1 ± 1,3

Valdenegro *et al.* (2013) encontraram para a *Physalis peruviana* L. um conteúdo de umidade de $82,1 \pm 1,3$ % (base úmida), enquanto que Rodrigues *et al.* (2009) realizaram análises físico-químicas para a fruta fresca e encontraram o conteúdo de umidade de $80,9 \pm 1,6$ % (base úmida); sendo assim, o conteúdo de umidade encontrado no presente trabalho é condizente com o valor encontrado por outros autores. Os trabalhos de Puente *et al.* (2011) e Valdenegro *et al.* (2013) relataram valores do conteúdo de sólidos solúveis para a *Physalis peruviana* L., determinados por um refratômetro de bancada, variando de 12 a 16 °Brix. A variação do conteúdo de sólidos solúveis na fruta é dependente principalmente do seu grau de maturação.

4.2. Perda de Água

Os conteúdos de umidade de cada curva de desidratação estão plotados em função do tempo de imersão na Figura 15, os valores estão normalizados (x_t^w/x_o^w) a fim de possibilitar uma melhor comparação dos resultados experimentais (x_t^w e x_o^w representam o teor de umidade de uma amostra no tempo t de desidratação e no início do processamento, respectivamente).

Figura 15. Variação adimensional do teor de umidade com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.



Os dados apresentados na Figura 15 mostram que o aumento da temperatura do processo de desidratação osmótica promoveu maior decréscimo no teor de umidade das physalis. O experimento de desidratação realizado com a solução osmótica mais concentrada (70 °Brix) e submetida a uma maior temperatura de análise (70 °C) foi o que apresentou maior perda de água durante o processamento. Os dados de perda de água nessa condição experimental apresentaram um aumento exponencial com o tempo de imersão na solução osmótica. De acordo com Khoiyi & Hesari (2007), esse comportamento é explicado por duas razões: o aumento da temperatura provoca um decréscimo na viscosidade da solução osmótica e um aumento da difusividade mássica efetiva. Segundo Rastogi, Angersbach & Knorr (2000), um aumento na temperatura de processo pode promover um aumento da permeabilidade da estrutura do fruto, e portanto, um aumento da difusividade mássica efetiva.

Mercali *et al.* (2011) realizaram um estudo sobre o processo de desidratação osmótica em bananas (cultivar Prata), em um período de 0 a 10 horas sob condições constantes. Nesse estudo foram utilizadas soluções ternárias, contendo água destilada, açúcar e sal comercial, de acordo com um planejamento fatorial composto central. Apesar do longo tempo de processo, os autores descreveram a necessidade de utilizar o modelo de Peleg (1988) para determinação dos dados de equilíbrio e os resultados obtidos também mostraram que as curvas de perda de água e ganho de solutos apresentaram um aumento exponencial com o tempo.

Alguns autores (AZOUBEL & MURR, 2004; ANDRADE *et al.*, 2007; MERCALI *et al.*, 2011) destacam que durante o processo de desidratação osmótica a taxa inicial de perda de água é elevada, enquanto que nas fases seguintes do processo, a taxa de perda de água torna-se mais lenta. Da mesma forma, esse comportamento ocorre para a incorporação de solutos: inicialmente a taxa de incorporação de sólidos é maior e vai diminuindo com o passar do tempo. No entanto, a análise da Figura 15, mostra que essa tendência comportamental não é observada para o processo de desidratação osmótica de amostras de physalis em todas as condições experimentais investigadas. Esta diferença provavelmente ocorre devido à casca cerosa da physalis, que atua como uma barreira ao processo de transferência de massa, conforme discutido anteriormente.

A Tabela 7 apresenta os valores de perda de água média relativos aos diferentes processos, após 10 horas. Os valores de umidade não normalizados em base seca (g de água por g de sólidos secos) estão apresentados no Apêndice A para todas as condições experimentais avaliadas durante o presente trabalho.

Para os experimentos realizados na temperatura de 40 °C e na concentração de 40 °Brix e os realizados na temperatura de 40 °C com concentração de 70 °Brix é possível observar que houve uma perda de água muito pequena quando comparada à perda de água apresentada pelas outras condições experimentais. A análise desses dados sugere que independente da concentração da solução osmótica, quando a temperatura de operação é baixa (inferior a 55 °C), o processo de desidratação osmótica de physalis não é favorecido, e, portanto, o resultado obtido para essas condições experimentais não é satisfatório. O Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 16, corrobora este fato, demonstrando que a temperatura é o fator que possui maior significância estatística, seguido pela interação entre as variáveis e, finalmente, pela concentração da solução osmótica.

Tabela 7. Perda de água (WL) após 10 horas de desidratação osmótica de physalis.

Temperatura (°C)	Concentração da solução (°Brix)	X_t^w (g de água/ g de sólidos secos)	WL (%)
40	70	0,144 ± 0,021	3,13 ± 0,17 ^{c,*}
40	40	0,386 ± 0,097	8,61 ± 2,17 ^{c,*}
70	40	2,161 ± 0,124	48,70 ± 3,55 ^{b,*}
70	70	3,774 ± 0,299	82,95 ± 1,53 ^{a,**}
55	55	2,315 ± 0,343	50,43 ± 3,90 ^{b,***}

^a, ^b, ^c, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p > 0,05).

*Média ± desvio padrão relativos à realização de 2 experimentos.

**Média ± desvio padrão relativos à realização de 3 experimentos.

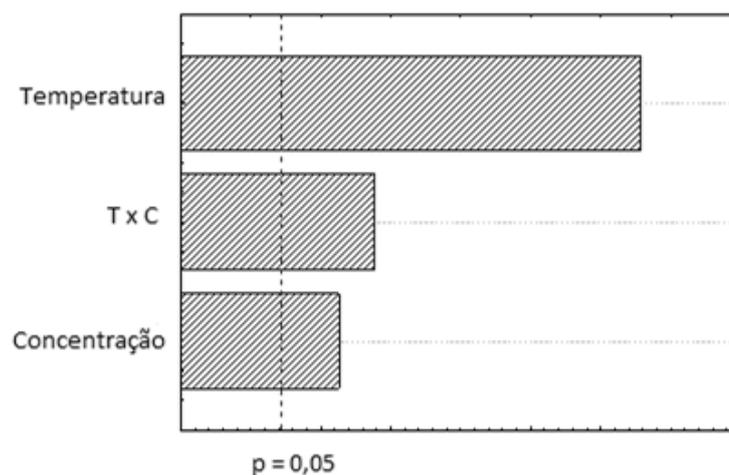
***Média ± desvio padrão relativos à realização de 6 experimentos.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, a perda de água após 10 horas de desidratação osmótica de physalis variou de 3 a 83 %, dependendo das condições experimentais. Azoubel & Murr (2004) avaliaram a perda de água de tomates cereja desidratados osmoticamente por 6 horas, usando soluções ternárias compostas de sacarose e sal, e encontraram valores variando entre 12 e 25 %. Silva *et al.* (2012) avaliaram o processo de desidratação osmótica de acerola durante 12 horas (utilizando concentração da solução osmótica de sacarose de 65 °Brix, na temperatura de 27 °C, sem agitação e variando a razão entre a fruta e a solução de 1:4, 1:10 e 1:15) e a perda de água variou entre 25 e 40 %. Enquanto que Rodríguez *et al.* (2013) avaliaram diferentes solutos durante o processo de desidratação osmótica de nectarinas (concentração da solução osmótica foi de 40 e 60 °Brix,

nas temperaturas de 25 e 40 °C durante 2 horas) e verificaram que o processamento usando a solução osmótica de sorbitol apresentou maiores perdas de água (variando de 18 a 36 %) do que usando a solução osmótica de glicose (variou de 20 a 30 %). É importante ressaltar que esses valores de perda de água são diferentes em função de diversos fatores, entre eles é possível citar: as diferentes matrizes alimentícias estudadas, os diferentes tempos de processo e condições experimentais utilizados, assim como, a forma de cálculo utilizada, alguns autores calculam a perda de água usando como referência a quantidade de sólidos secos presente inicialmente nas amostras, diferentemente da fórmula de cálculo utilizada no presente trabalho, conforme Equação (13) apresentada no Capítulo 3 - Materiais e Métodos.

A análise estatística dos dados de perda de água (*WL*) também está apresentada na Tabela 7, sendo, portanto, possível verificar que os experimentos realizados na temperatura de 40 °C, independente da concentração da solução osmótica não apresentaram diferenças estatisticamente pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$). Assim como os experimentos realizados na condição de temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix não apresentaram diferenças estatísticas ($p > 0,05$) se comparados aos experimentos realizados na condição do ponto central (temperatura de 55 °C e concentração da solução de 55 °Brix).

Figura 16. Efeitos padronizados do Diagrama de Pareto para a perda de água (*WL*).



Objetivando avaliar a influência dos efeitos das variáveis temperatura e concentração da solução osmótica e da sua interação (TxC) sobre os dados de perda de água (*WL*), foi realizada uma análise estatística, utilizando o software STATISTICA, ao nível de significância de 95 % ($p = 0,05$) de confiança. Os resultados estão apresentados na Tabela 8 e demonstram que, conforme já mostrado através da análise dos resultados apresentados no

Diagrama de Pareto (Figura 16), tanto a temperatura quanto a concentração da solução osmótica, bem como a interação entre essas duas variáveis, foram significativas (coeficiente p menor do que 0,05) e apresentam efeito positivo sobre a perda de água (*WL*).

Valente (2007) avaliou o processo de desidratação osmótica de abacaxi para diferentes temperaturas e concentrações de sacarose da solução osmótica e concluiu que ambos os parâmetros, temperatura e concentração da solução osmótica, exerceram um efeito positivo sobre a perda de água desta fruta ao longo do processo; esse resultado é semelhante ao encontrado no presente trabalho.

Tabela 8. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a perda de água.

Fatores	Efeitos estimados	Coefficiente p
Termo independente	41,78	<0,001*
Temperatura (T)	58,87	<0,001*
Concentração da solução (C)	13,30	0,047*
T x C	18,78	0,009*

*significativo ($p < 0,05$)

O modelo codificado proposto para representar a perda de água (*WL*) durante o processo de desidratação osmótica de physalis, dentro dos limites de temperatura e composição da solução, pode ser representado pela Equação (23):

$$WL (\%) = 41,78 + 29,4 \cdot x_1 + 6,6 \cdot x_2 + 9,4 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (23)$$

Em que x_1 representa a temperatura da solução osmótica e x_2 representa a concentração da solução de sacarose.

Uma análise de variância foi realizada para avaliar a significância da regressão do modelo para previsão dos dados perda de água, a um nível de confiança de 95 %; por meio do teste F foi verificado que o modelo apresentou uma regressão significativa ($F_{\text{calculado}}$ superior ao F_{tabelado}) e os resultados estão apresentados na Tabela 9. O coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo foi de 0,911, indicando que o modelo explicou 91,1 % da variação dos dados observados. Sendo assim, pode-se verificar que o modelo foi validado por ANOVA, mostrando-se adequado para representar o processo de perda de água durante a desidratação

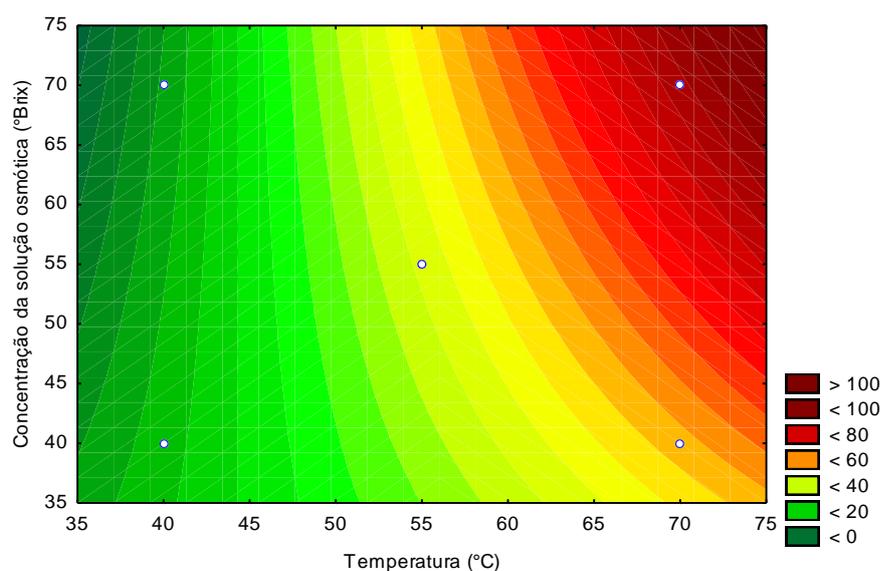
osmótica de physalis, dentro das condições de temperatura e concentração da solução osmótica estudadas, e da interação entre essas duas variáveis.

Tabela 9. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão da perda de água.

Fator	SQ	GL	MQ	F _{calculado}	F _{tabelado}
Regressão	8748,3	3	2916,1	37,6	3,6
Resíduos (Erro)	853,5	11	77,6		
Total	9601,8	14			R ² = 0,911

A Figura 17 apresenta as linhas de contorno para a perda de água, válida para a variação de *WL* em função da temperatura (variando entre 40 e 70 °C) e da concentração de sacarose na solução osmótica (variando entre 40 e 70 °Brix). Verifica-se que a perda de água aumenta tanto com o aumento da temperatura da solução quanto com o aumento da concentração de sacarose da solução osmótica. Park *et al.* (2002) também verificaram que a perda de água aumentou com o aumento da temperatura de processamento e com o aumento da concentração de sacarose na solução osmótica durante o processo de desidratação osmótica em pêras.

Figura 17. Linhas de contorno para a perda de água em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.



Através da análise do comportamento das curvas de nível, apresentadas na Figura 17, observa-se que a perda de água (WL) é maior nos níveis máximos das variáveis estudadas. Este resultado está de acordo com os fundamentos teóricos referentes ao processo de desidratação osmótica. Segundo Rastogi & Raghavarao (1997) o aumento da temperatura e/ou da concentração da solução implica em um aumento do gradiente de pressão osmótica (força motriz do processo) e, conseqüentemente, em um aumento na taxa de transferência de massa.

4.2.1. Determinação do conteúdo de umidade no equilíbrio

Anteriormente à realização do cálculo para determinação da difusividade mássica efetiva da água (D_{ef}^w) foi realizada a determinação do conteúdo de umidade (g de água por g de sólidos secos) no equilíbrio conforme metodologia descrita por Rastogi & Raghavarao (2004) uma vez que foi o método que apresentou o melhor ajuste dos dados; a descrição desse método está apresentada na Seção 2.2.5. Na Figura 18 está apresentado o gráfico que foi utilizado para determinar o conteúdo de umidade no equilíbrio para o experimento realizado com temperatura de 70 °C e concentração da solução de sacarose de 70 °Brix onde se tem a taxa de desidratação osmótica de *physalis* plotada versus o conteúdo de umidade (em base seca). O valor do conteúdo de umidade no equilíbrio (g de água por g de sólidos secos) foi determinado através do prolongamento da reta (linha tracejada) até o eixo da abcissa (eixo x). Esse mesmo procedimento foi realizado para todas as condições experimentais, como os gráficos apresentaram comportamento semelhante àquele mostrado na Figura 18, os valores de umidade de equilíbrio (x_{∞}^w) para todas as condições experimentais estão apresentados na Tabela 10. Conforme pode ser observado, o ajuste dos dados à equação linear apresentou um coeficiente de determinação acima de 0,9 para a maioria dos casos; o pior ajuste foi para o caso de 55 °C e 55 °Brix que forneceu um coeficiente de determinação superior a 0,8; sendo considerados satisfatórios.

Figura 18. Taxa de desidratação osmótica de physalis versus conteúdo de umidade (em base seca) para o experimento realizado na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix.

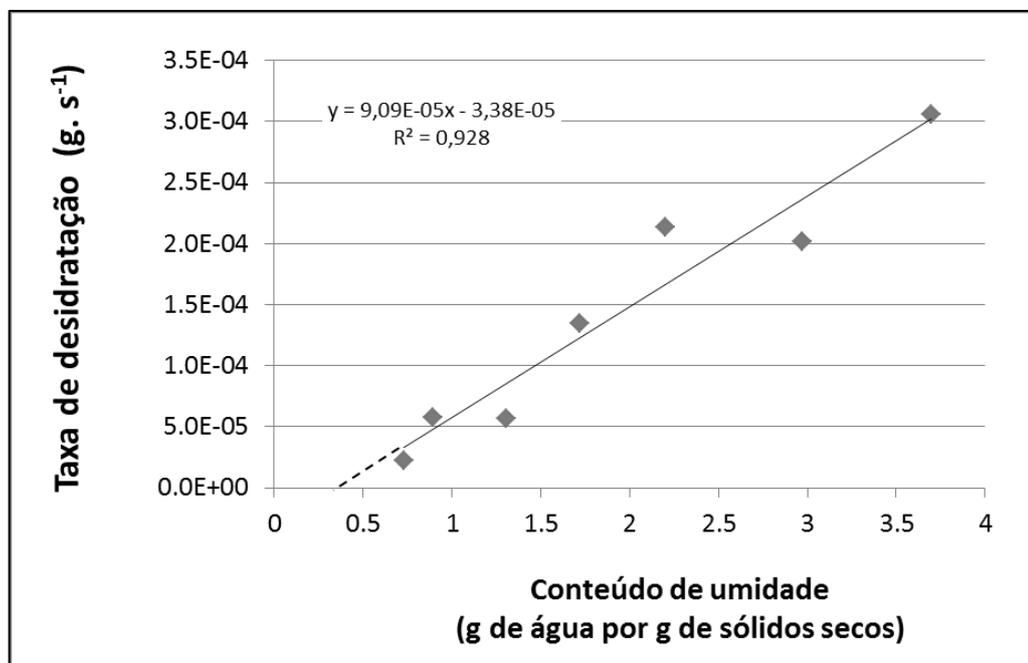


Tabela 10. Conteúdo de umidade no equilíbrio (x_{∞}^w) e os respectivos coeficientes de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.

Experimento	T (°C)	C (°Brix)	x_{∞}^w	R ²
1	40	40	4,02	0,818
10	40	40	4,06	0,998
3	40	70	4,17	0,861
12	40	70	4,48	0,998
4	70	40	1,51	0,848
13	70	40	1,67	0,821
2	70	70	0,42	0,934
9	70	70	0,37	0,928
16	70	70	0,58	0,989
6	55	55	1,57	0,817
7	55	55	1,69	0,878
8	55	55	1,78	0,844
11	55	55	1,09	0,973
14	55	55	1,34	0,855
19	55	55	0,82	0,808

4.2.2. Difusividade mássica efetiva para a água

A difusividade mássica efetiva da água foi determinada utilizando a solução da Segunda Lei de Fick da difusão para sistemas esféricos, levando em consideração os cinco primeiros termos do somatório, conforme metodologia apresentada na Seção 3.5. Diversos autores já utilizaram essa metodologia para determinar a difusividade mássica efetiva podendo ser citados trabalhos de Medina-Vivanco, Sobral & Hubinger (2002) para tiras de tilápia, Park, Bin & Brod (2002) para pêras, Telis, Murari & Yamashita (2004) para tomates e Mercali *et al.*, (2011) para bananas. Outros poucos autores utilizaram somente o primeiro termo da solução para o cálculo da difusividade mássica efetiva, citando-se: Vega-Gálvez *et al.* (2012) em seu estudo de cinética de secagem de physalis (*Physalis peruviana* L.)

utilizando ar quente e Nsonzi & Ramaswamy (1998) em um estudo da cinética de desidratação osmótica de mirtilos.

A Equação (15) foi resolvida utilizando o Solver do Excel, versão, 7.0, e obteve-se o número de Fourier em cada tempo do processamento, para cada uma das condições de processo estudadas. Em seguida, foi plotado o Número de Fourier versus o tempo de imersão da fruta no banho de desidratação osmótica determinando-se a difusividade mássica efetiva para a água através da inclinação da reta. A Figura 19 apresenta o Número de Fourier plotado versus o tempo para o experimento realizado na temperatura de 70 °C e concentração da solução de sacarose de 70 °Brix. Os demais experimentos apresentaram comportamento semelhante e os resultados para os valores de D_{ef}^w nas diferentes combinações de temperatura e concentração da solução osmótica estão apresentados na Tabela 11. A determinação da difusividade mássica efetiva para a água apresentou um bom ajuste, apresentando coeficiente de regressão superior a 0,95.

Figura 19. Número de Fourier versus o tempo para as condições experimentais de temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix.

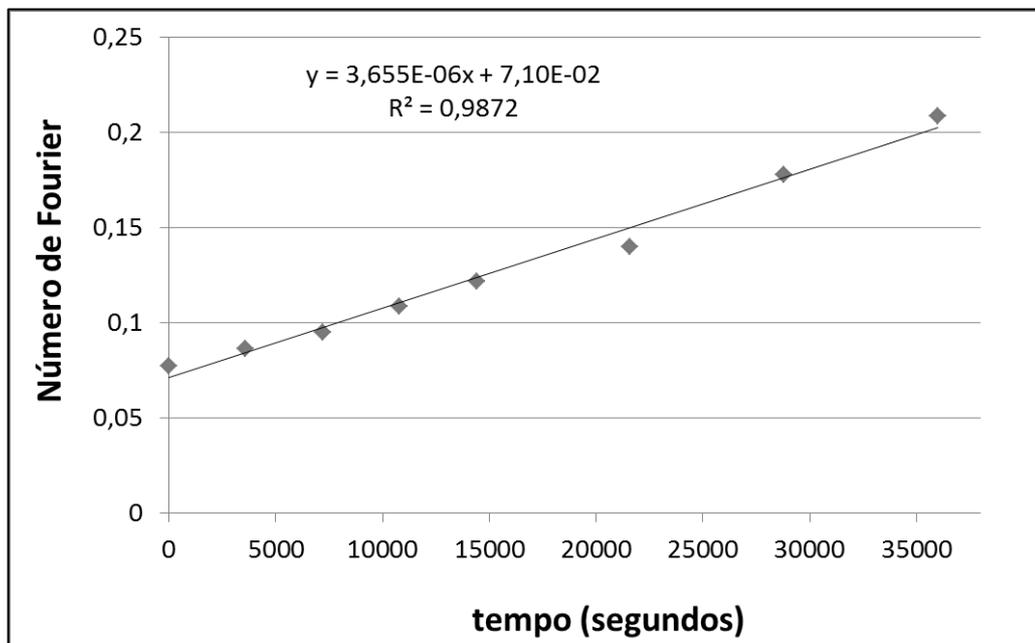


Tabela 11. Difusividade mássica efetiva da água ($D_{ef}^w \cdot 10^{10}$) em $m^2 s^{-1}$ e o coeficiente de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.

Temperatura (°C)	Concentração da solução (°Brix)	Média ± Desvio padrão x 10^{10} ($m^2 s^{-1}$)	R ²
40	40	2,47 ± 0,75 ^b	0,970
40	70	2,44 ± 0,12 ^b	0,997
70	40	3,72 ± 0,43 ^b	0,984
70	70	7,60 ± 0,68 ^a	0,989
55	55	3,24 ± 0,49 ^b	0,988

^a, ^b, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

Na Tabela 11 observa-se que os resultados obtidos para a difusividade mássica efetiva da água após 10 horas de desidratação osmótica de physalis encontraram-se na faixa de 2,44 - 7,60 x 10^{-10} $m^2 s^{-1}$. Verifica-se através da análise estatística que somente o processo de desidratação osmótica realizado na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix apresentou a difusividade mássica efetiva média da água estatisticamente diferente das outras condições experimentais realizadas no presente trabalho.

Conforme mencionado anteriormente, não foram encontrados na literatura trabalhos sobre o processamento de physalis via desidratação osmótica para fins de comparação com os dados encontrados no presente trabalho. No entanto, foram encontrados dois trabalhos sobre o processamento desta fruta por secagem utilizando ar quente e, por isso, os resultados obtidos por Vásquez-Parra, Ochoa-Martínez & Bustos-Parra (2013) e Vega-Gálvez *et al.* (2012), estão descritos a seguir.

Vásquez-Parra, Ochoa-Martínez & Bustos-Parra (2013) avaliaram o efeito de diferentes pré-tratamentos sobre o processo de secagem convectiva de physalis. O processo de secagem teve duração de 10 horas, na temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 2 $m s^{-1}$. Os resultados da difusividade mássica efetiva da água, utilizando os cinco primeiros termos da série da solução da Segunda Lei de Fick, variaram entre 0,66 - 0,74 x 10^{-10} $m^2 s^{-1}$. Este valor é aproximadamente 10 vezes menor do que o valor encontrado no presente trabalho. Acredita-se que esta diferença possa ser decorrente da consideração de concentração especificada na superfície feita por estes autores; o que pode não ser adequado uma vez que uma velocidade

do ar de secagem de 2 m s^{-1} pode não ser suficientemente elevada para conduzir a uma resistência convectiva negligenciável.

Vega-Gálvez *et al.* (2012) estudaram a cinética de secagem de *Physalis peruviana* L utilizando ar quente em diferentes temperaturas (60, 70, 80 e 90 °C), e a difusividade mássica efetiva para água foi calculada levando em consideração somente o primeiro termo da série da solução da Segunda Lei de Fick para a difusão e os valores médios encontrados neste estudo variaram entre $4,67 - 14,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Azoubel & Murr (2004) desidrataram tomates cerejas osmoticamente em soluções ternárias (contendo sal e sacarose) na temperatura de 25 °C e encontraram valores entre 4,3 e $17,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Em outro estudo, Khoyi & Hesari (2007) estudaram o processo de desidratação osmótica de damasco (cultivar *Nasiry*), para as seguintes variáveis: concentração de sacarose (50, 60 e 70 °Brix), temperatura (30, 40, 50 e 60 °C) e razão de solução e amostra (5:1, 10:1 e 15:1). A difusividade mássica efetiva da água variou entre 11,2 e $41,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Silva *et al.* (2012) avaliaram a perda de água durante o processo de desidratação osmótica de acerola (*Malpighia puniceifolia*) por 12 horas em uma solução de 65 °Brix, na temperatura de 27 °C, sem agitação, usando diferentes razões de fruta para solução (1:4, 1:10 e 1:15). A cinética de desidratação do produto foi simulada usando um modelo de difusão e dois métodos de otimização: Levenberg-Marquardt e o Algoritmo da Evolução Diferencial; o cálculo da difusividade mássica efetiva da água resultou no valor médio de $1,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Mercali *et al.* (2011) desidrataram osmoticamente bananas tipo *Prata* em diferentes temperaturas (25 – 55 °C), concentrações de sacarose (30 – 60 % m/m) e concentrações de sal (2-10 % m/m) e encontraram valores para difusividade mássica efetiva da água variando entre $5,19 - 6,47 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Esta diferença existente entre os resultados obtidos para a difusividade mássica efetiva da água pode ser justificada pela utilização de diversos tipos de frutas com diferentes graus de maturação e diferentes formas estruturais, bem como, pelas diferentes condições experimentais utilizadas nos trabalhos; mesmo quando a fruta estudada é a mesma, variedades e graus de maturação diferentes podem levar a diferentes valores de difusividade mássica efetiva.

4.3. Incorporação de sólidos

A análise da difusão mássica da sacarose durante o processo de desidratação osmótica de physalis foi realizada através da análise de sólidos solúveis (°Brix) usando um refratômetro de bancada e por cromatografia líquida de alta eficiência (g de glicose por g de amostra). Estas metodologias foram realizadas simultaneamente para correlacionar as análises por esses dois métodos quando aplicado o processo de desidratação osmótica. Os resultados apresentados estão normalizados (em relação ao conteúdo de sólidos solúveis inicial presente na fruta para o caso da análise em refratômetro e em relação ao conteúdo inicial de açúcares na fruta para a análise em HPLC) a fim de possibilitar uma melhor comparação dos resultados experimentais.

4.3.1. Análise de sólidos solúveis (refratômetro)

A Figura 20 apresenta o ganho de sólidos solúveis (°Brix) em função do tempo de imersão para todas as condições investigadas no presente trabalho e a Tabela 12 apresenta os valores normalizados (final / inicial) do ganho de sólidos solúveis, após 10 horas de processamento.

Figura 20. Variação adimensional do teor de sólidos solúveis com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.

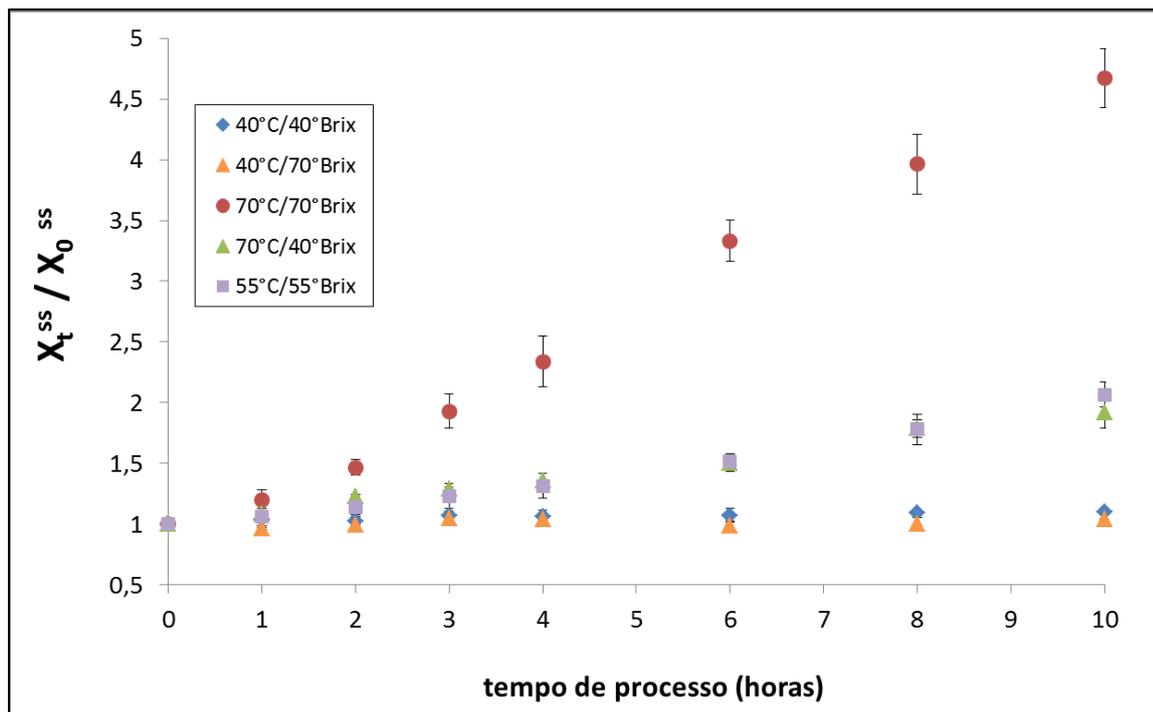


Tabela 12. Incorporação adimensional de sólidos solúveis (SS) após 10 horas de desidratação osmótica de physalis.

Temperatura da solução osmótica (°C)	Concentração da solução de sacarose (°Brix)	SS (final/inicial)
40	70	1,04 ± 0,01 ^{c, *}
40	40	1,09 ± 0,01 ^{c, *}
70	40	1,92 ± 0,13 ^{b, *}
70	70	4,67 ± 0,24 ^{a, **}
55	55	2,06 ± 0,11 ^{b, ***}

^{a, b, c}, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

*Média ± desvio padrão relativos à realização de 2 experimentos.

**Média ± desvio padrão relativos à realização de 3 experimentos.

***Média ± desvio padrão relativos à realização de 6 experimentos.

A análise da Figura 20 e da Tabela 12 revela que para os experimentos realizados na temperatura de 40 °C, independente da concentração da solução osmótica, não houve incorporação significativa de sólidos solúveis nas amostras de physalis; também é possível notar que nas duas condições experimentais realizadas na temperatura de 40 °C, com concentração da solução osmótica tanto de 40 como de 70 % de sólidos solúveis, não houve modificação estrutural nas amostras de physalis ao longo de 10 horas de desidratação osmótica e, que os resultados de incorporação de sólidos não diferem estatisticamente ($p > 0,05$), conforme já havia sido discutido anteriormente pela análise de perda de água.

Além disso, é possível verificar que a condição experimental de temperatura de 70 °C e concentração da solução de 40 °Brix e a condição do ponto central (condição com temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix) apresentaram valores de ganho de sólidos estatisticamente iguais ($p > 0,05$). De fato, na Figura 20 os valores para estas condições experimentais são muito próximos, sendo que para o tempo de processo de 6 horas de desidratação osmótica os pontos experimentais apresentam-se sobrepostos. Essa semelhança também já havia sido observada para os dados referentes à perda de água.

A avaliação das curvas de desidratação mostra que em temperaturas de processo mais elevadas tem-se uma tendência de aumento no teor de incorporação de sacarose das amostras. Segundo Rastogi & Raghavarao (2004), este efeito ocorre porque o aumento da temperatura

promove uma diminuição na viscosidade da solução osmótica e um aumento na difusividade mássica efetiva da sacarose.

No estudo realizado por Mercali *et al.* (2011) de desidratação osmótica de bananas (*Musa sapientum*, *shum.* cultivar Prata) foi possível verificar que as soluções osmóticas de sacarose mais concentradas contribuíram para uma maior incorporação de açúcar. No entanto, no presente trabalho encontrou-se um comportamento um pouco diferente: o ganho de sólidos para a condição experimental de solução osmótica mais concentrada (70 °Brix) na menor temperatura (40 °C) de processamento não apresentou tendência a aumentar, permanecendo sempre com um valor próximo da unidade, mesmo após 10 horas de processamento. Esta diferença de comportamento pode ser explicada devido à presença da casca cerosa da *physalis*, que atua como uma barreira ao processo de transferência mássica, tanto para a perda de água da fruta quanto para a incorporação de solutos nas amostras, conforme citado anteriormente. Outro aspecto que pode ser destacado é o fato de que a viscosidade da solução osmótica nessa condição experimental é maior do que em qualquer outra condição experimental testada, aumentando a dificuldade de ocorrer à transferência de massa entre a fruta e a solução osmótica.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 12, a incorporação máxima de sólidos solúveis após 10 horas de desidratação osmótica de *physalis* foi de 4,67 vezes em relação ao valor inicial (os valores não normalizados referentes a essa análise realizada em refratômetro estão apresentados no Apêndice B). Silva *et al.* (2012) avaliaram o processo de desidratação osmótica de acerola durante 12 horas (utilizando concentração da solução osmótica de sacarose de 65 °Brix, na temperatura de 27 °C, sem agitação e variando a razão entre a fruta e a solução de 1:4, 1:10 e 1:15) e verificaram que o conteúdo de sólidos solúveis variou de 6,3 até 26,2 °Brix, sendo assim, a incorporação máxima de sólidos solúveis encontrada neste estudo foi de 4,2 vezes em relação ao valor inicial presente. Enquanto que Rodríguez *et al.* (2013) estudaram o processo de desidratação osmótica de nectarinas (concentração da solução osmótica de 40 e 60 °Brix, nas temperaturas de 25 e 40 °C durante 2 horas) e verificaram que o teor de sólidos solúveis variou de 21,5 até 31 °Brix, desta forma, a máxima quantidade de sólidos solúveis incorporada foi de 1,4 vezes em relação ao conteúdo inicial.

Utilizando o software STATISTICA foram calculados os efeitos das variáveis temperatura (°C) e concentração da solução osmótica (°Brix) e da sua interação (TxC), assim como a significância estatística (p). Conforme apresentado na Tabela 13, ao nível de

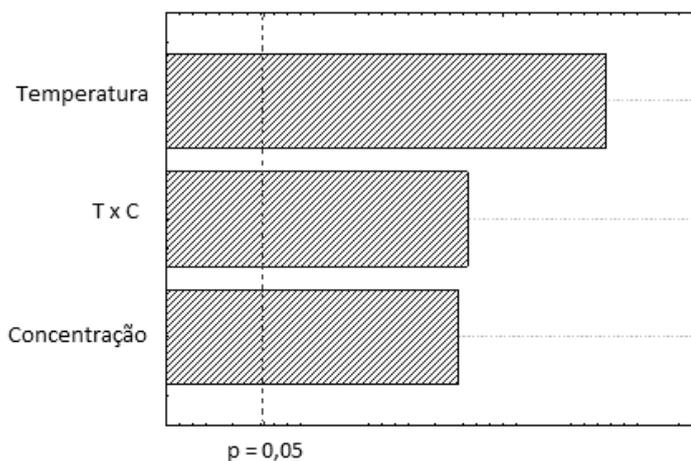
significância de 95 % de confiança, tanto a temperatura quanto a concentração da solução osmótica, bem como a interação entre essas duas variáveis foram significativas, apresentando um efeito positivo sobre a incorporação de sólidos. Este resultado também pode ser observado pelo Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 21.

Tabela 13. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a incorporação de sólidos solúveis.

Fatores	Efeitos estimados	p valor
Termo independente	2,13	<0,001*
Temperatura (T)	2,22	<0,001*
Concentração da solução (C)	1,34	<0,001*
T x C	1,39	<0,001*

*significativo ($p < 0,05$)

Figura 21. Diagrama de Pareto para análise de incorporação de sólidos solúveis (refratômetro).



Além disso, uma análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar a significância da regressão e do ajuste do modelo para o ganho de solutos (análise de sólidos solúveis utilizando um refratômetro de bancada), a um nível de confiança de 95 % e os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de incorporação de sólidos durante o processo de desidratação osmótica de physalis.

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}	F_{tabelado}
Regressão	17,44	3	5,81	489,05	3,59
Resíduos (Erro)	0,131	11	0,012		
Total	17,57	14			R ² = 0,993

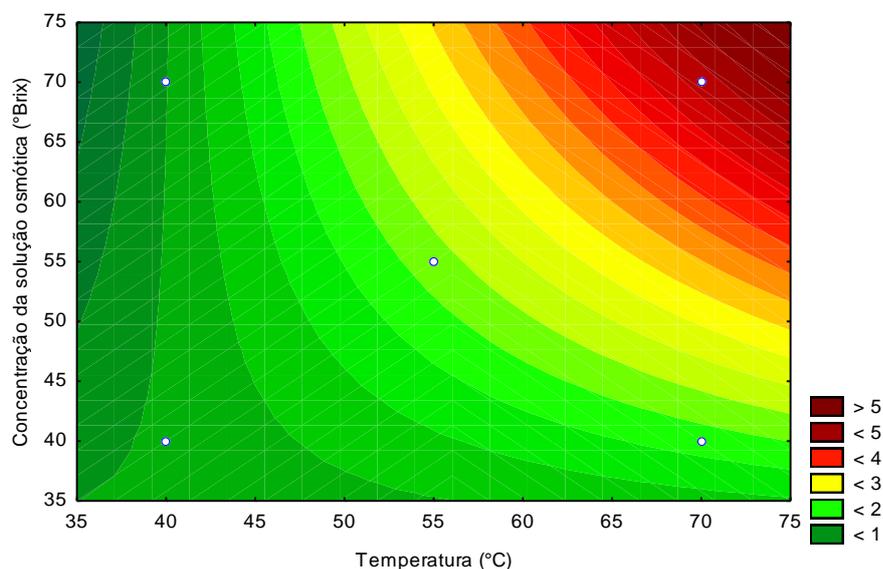
Através da análise dos dados apresentados na Tabela 14 é possível verificar, por meio da realização do teste F, que o modelo apresentou uma regressão estatisticamente significativa ($F_{\text{calculado}}$ superior ao F_{tabelado}). O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,993, indicando que o modelo proposto para a incorporação de sólidos explicou 99,3 % da variação dos dados observados, e, portanto, se ajusta satisfatoriamente aos dados experimentais. Desta forma, o modelo codificado proposto para representar a incorporação de sólidos solúveis durante o processo de desidratação osmótica de physalis, dentro dos limites da temperatura e da composição da solução estudadas, pode ser representado pela Equação (24), apresentada a seguir:

$$SS = 2,13 + 1,11 \cdot x_1 + 0,67 \cdot x_2 + 0,69 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (24)$$

Em que x_1 representa a temperatura da solução osmótica e x_2 representa a concentração da solução de sacarose.

As curvas de nível obtidas para a incorporação de sólidos solúveis durante o processo de desidratação osmótica de physalis estão apresentadas na Figura 22; é possível verificar que independente da concentração da solução osmótica, a incorporação de sólidos solúveis é minimizada quando o processo de desidratação é realizado em temperaturas menores do que 60 °C. No entanto, para a condição experimental de máxima temperatura (70 °C) e máxima concentração osmótica (70 g por 100 g de solução) verifica-se uma elevada taxa de incorporação de sólidos solúveis; possivelmente graças às modificações causadas pela temperatura na estrutura cerosa da casca da physalis, promovendo uma elevada perda de água e um maior ganho de sólidos.

Figura 22. Linhas de contorno para a incorporação de sólidos solúveis (análise realizada em refratômetro, °Brix) em função da temperatura e da concentração da solução osmótica de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.



4.3.2. Análise de açúcares (HPLC)

A Figura 23 apresenta os valores do conteúdo de açúcar incorporado - normalizados em relação ao conteúdo de açúcar presente inicialmente na fruta (x_t^{sac}/x_o^{sac}) - em função do tempo de desidratação. Os valores do conteúdo de açúcar (expresso em g de glicose por g de amostra) são referentes às análises realizadas por cromatografia líquida de alto desempenho com detector de índice de refração.

No Apêndice C estão apresentados os cromatogramas da análise de açúcares obtidos pelo HPLC-IR para a amostra de physalis *in natura* e para a amostra de physalis após oito (8) horas de processo de desidratação osmótica, na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix, respectivamente, onde é possível identificar o pico da glicose (tempo de retenção de 12,3 minutos) e da frutose (tempo de retenção de 13,3 minutos) e suas respectivas áreas; esses picos foram identificados através da análise dos padrões de glicose e frutose no HPLC-IR. Os valores da área de cada pico são utilizados para a determinação da quantidade de açúcar presente nas amostras em cada tempo de análise, sendo determinados através da curva de calibração apresentada no Capítulo 3 – Materiais e Métodos.

A Tabela 15 apresenta o conteúdo de açúcar final normalizado (conteúdo final em relação ao inicial) após 10 horas de desidratação osmótica e a análise estatística desses dados

para todas as condições investigadas neste trabalho. O conteúdo de açúcares incorporados à physalis (expresso em g de glicose por g de amostra) durante o processamento osmótico está apresentado no Apêndice D para todos os experimentos realizados.

Figura 23. Variação adimensional do teor de açúcar com o tempo de imersão durante o processo de desidratação osmótica de physalis.

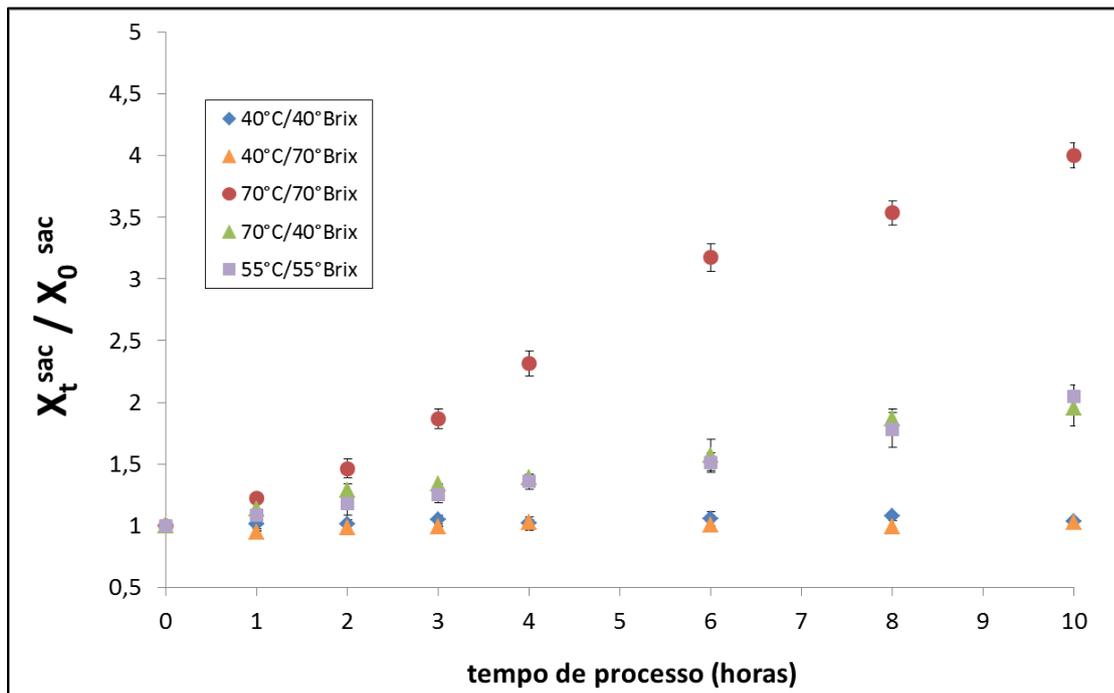


Tabela 15. Incorporação de açúcares (SA) no final do processo de desidratação osmótica.

Temperatura da solução (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	SA (final/inicial)
40	70	1,02 ± 0,04 ^{c, *}
40	40	1,03 ± 0,01 ^{c, *}
70	40	1,95 ± 0,14 ^{b, *}
70	70	3,99 ± 0,10 ^{a, **}
55	55	2,05 ± 0,09 ^{b, ***}

^{a, b, c}, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

*Média ± desvio padrão relativos à realização de 2 experimentos.

**Média ± desvio padrão relativos à realização de 3 experimentos.

***Média ± desvio padrão relativos à realização de 6 experimentos.

É possível notar, através da análise da Tabela 15, que nas duas condições experimentais realizadas na temperatura de 40 °C, independente da concentração da solução osmótica ser 40 ou 70 % de sólidos solúveis, os resultados de incorporação de açúcares não diferiram estatisticamente ($p > 0,05$), conforme já havia sido discutido anteriormente tanto para a análise de perda de água, quanto para a análise de incorporação de sólidos, através da leitura direta realizada em refratômetro. Além disso, verifica-se que a condição experimental de temperatura de 70 °C e concentração da solução de 40 °Brix e a condição do ponto central (temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix) também apresentaram valores de incorporação de açúcar estatisticamente iguais ($p > 0,05$). Enquanto a condição experimental de temperatura da solução de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) das demais condições experimentais testadas para o parâmetro de incorporação de açúcares.

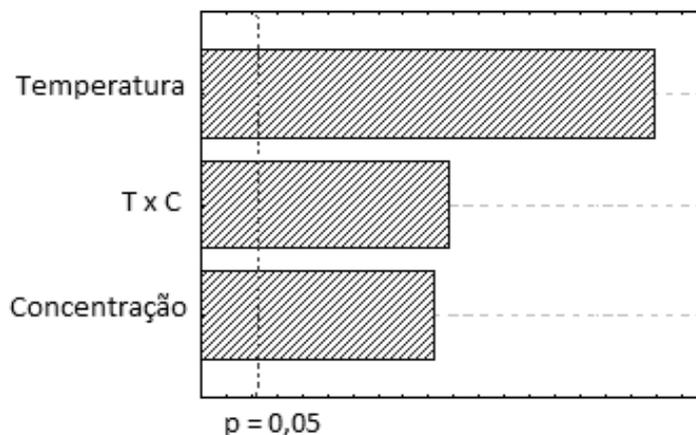
Utilizando o software STATISTICA foram calculados os efeitos das variáveis temperatura e concentração da solução osmótica e da sua interação, assim a significância estatística (valor p) em relação aos dados de incorporação de açúcares ao final do processo de desidratação osmótica de physalis e os resultados estão apresentados na Tabela 16. Conforme pode ser observado, ao nível de significância de 95 % de confiança, tanto a temperatura quanto a concentração da solução osmótica, bem como a interação entre essas duas variáveis foram significativas ($p < 0,05$), apresentando um efeito positivo sobre a incorporação de açúcar. Este resultado também pode ser verificado através da análise do Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 24.

Tabela 16. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a incorporação de açúcar.

Fatores	Efeitos estimados	Coefficiente p
Termo independente	2,03	<0,001*
Temperatura (T)	1,92	<0,001*
Concentração da solução (C)	0,99	<0,001*
T x C	1,05	<0,001*

*significativo ($p < 0,05$)

Figura 24. Diagrama de Pareto para análise de incorporação de açúcar (HPLC).



Também foi realizada uma análise de variância para verificar a significância da regressão e do ajuste do modelo para o ganho de açúcar após o processo de desidratação osmótica de physalis por 10 horas, a um nível de confiança de 95 %. Avaliando os valores desta análise apresentados na Tabela 17 é possível verificar, através da realização do teste F, que o modelo apresentou uma regressão significativa ($F_{\text{calculado}}$ superior ao F_{tabelado}). O coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo foi de 0,981, indicando que os dados foram validados por ANOVA, e explicaram 98,1 % da variação dos dados experimentais.

Tabela 17. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de incorporação de açúcar durante o processo de desidratação osmótica de physalis.

Fator	SQ	GL	MQ	$F_{\text{calculado}}$	F_{tabelado}
Regressão	12,62	3	4,207	167,71	3,71
Resíduos (Erro)	0,25	10	0,025		
Total	12,77	13			$R^2 = 0,981$

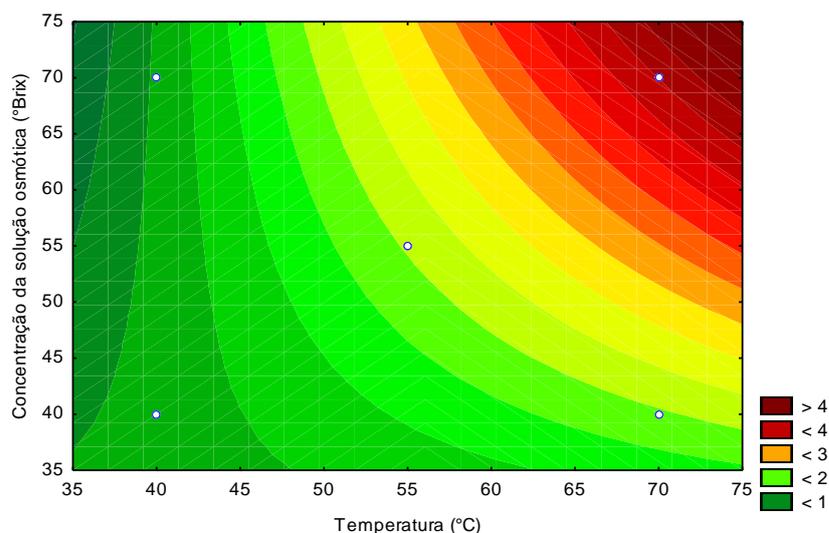
Desta forma, o modelo codificado proposto para representa à incorporação de açúcar durante o processo de desidratação osmótica de physalis, dentro dos limites de temperatura e composição da solução, pode ser representado pela Equação (25):

$$SA = 2,03 + 0,958 \cdot x_1 + 0,496 \cdot x_2 + 0,526 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (25)$$

Em que x_1 representa a temperatura da solução osmótica e x_2 representa a concentração da solução de sacarose.

A Figura 25 apresenta as linhas de contorno para a incorporação de açúcares (análise em HPLC-IR) em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.

Figura 25. Linhas de contorno para a incorporação de açúcar (análise em HPLC) em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.



A partir das curvas de nível obtidas para a incorporação de açúcar (Figura 25) durante o processo de desidratação osmótica de physalis é possível verificar que independente da concentração da solução osmótica, a incorporação de açúcar é minimizada quando o processo de desidratação é realizado em temperaturas menores do que 60 °C. No entanto, para a condição experimental de máxima temperatura (70 °C) e máxima concentração osmótica (70 g por 100 g de solução) verifica-se uma elevada taxa de incorporação de açúcar. Este resultado é semelhante ao apresentado anteriormente para a incorporação de sólidos solúveis durante o processo de desidratação osmótica de physalis, demonstrando que os resultados dessas análises podem apresentar uma forte correlação.

4.3.3. Correlação dos dados de incorporação de solutos durante o processamento

Através da análise das Figuras 20 e 23, apresentadas e discutidas anteriormente, é possível verificar que o comportamento dos gráficos de incorporação de açúcares é muito semelhante, independente do equipamento utilizado para análise ser um refratômetro de bancada ou cromatografia líquida de alto desempenho com detector de índice de refração

(HPLC-IR). Observa-se uma diferença referente aos desvios padrão em cada uma das análises. A análise de açúcares utilizando a técnica cromatográfica mostrou-se mais precisa oferecendo uma maior repetitividade dos dados experimentais, e, portanto, apresentou valores menores de desvio padrão quando comparada à análise de sólidos solúveis usando o refratômetro. No entanto, é importante ressaltar que a determinação do conteúdo de açúcares utilizando o HPLC-IR envolve a realização de diversas etapas anteriores à análise que demandam um tempo maior para a obtenção dos resultados e do elevado custo de aquisição e manutenção desse equipamento quando comparado a um refratômetro.

A fim de verificar a correlação existente entre os dados de incorporação de sólidos solúveis (obtidos por refratômetro) e os dados de incorporação de açúcar (obtidos pela análise em HPLC-IR) durante o processo de desidratação osmótica de *physalis*, os resultados normalizados (x_t^{ss}/x_o^{ss} e x_t^{sac}/x_o^{sac} , respectivamente) de cada uma dessas metodologias de análise foram plotados em um gráfico, apresentado na Figura 26 (referente aos experimentos realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix).

Os dados da análise do ganho de sólidos solúveis (refratômetro) e os da análise de incorporação de açúcar (HPLC-IR) são muito próximos, demonstrando que é possível avaliar a correlação linear entre esses dados experimentais. Através da realização de uma regressão linear dos dados é possível obter uma reta ($y = ax + b$), onde y representa o conteúdo de açúcar normalizado obtido por HPLC, x representa o conteúdo de sólidos solúveis normalizado obtido pela análise em refratômetro enquanto a e b são os coeficientes da regressão. O resultado das correlações obtidas entre esses dados, para todas as condições experimentais estudadas, está apresentado na Tabela 18.

Figura 26. Correlação entre as metodologias de análise de incorporação de sólidos solúveis (refratômetro) e de açúcares (HPLC) para a condição experimental de temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix.

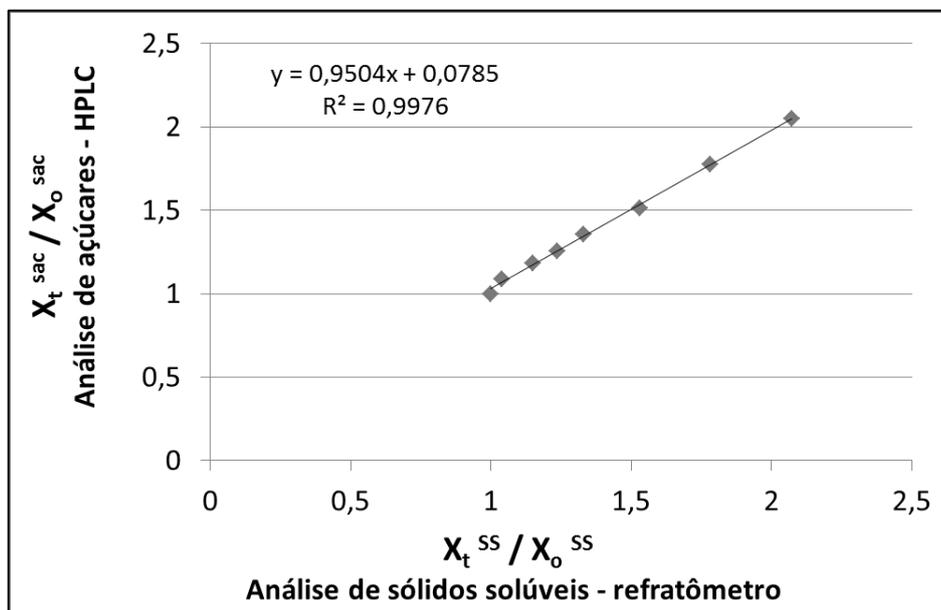


Tabela 18. Correlação entre o resultado da análise de incorporação de sólidos utilizando refratômetro e HPLC.

Temperatura da solução (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	a	b	R ²
40	40	0,865	0,127	0,947
40	70	0,988	0,0007	0,953
70	40	1,026	0,009	0,995
70	70	1,116	-0,166	0,983
55	55	0,950	0,078	0,998

A análise dos resultados apresentados na Tabela 18 mostra que os dados possuem boa correlação, uma vez que, todos os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram superiores a 0,94. Assim, recomenda-se a utilização da técnica que utiliza o refratômetro, pois a obtenção dos resultados é muito mais rápida e não exige que a amostra seja previamente preparada para análise, como é o caso da análise em HPLC-IR. Outro fator que deve ser levado em consideração nesta comparação é o custo da análise que, por HPLC-IR é bem mais elevado do que o custo da análise por refratômetro. A maior vantagem relacionada ao uso do refratômetro reside na simplicidade de utilização desta técnica, e pelo fato de que não requer

reagentes especiais para a determinação do conteúdo de sólidos solúveis, enquanto que a maior vantagem da análise de açúcares através da técnica cromatográfica (HPLC-IR) consiste na identificação e quantificação (com exatidão e precisão) dos diferentes tipos de açúcares presentes em uma amostra.

No entanto, vale ressaltar que a análise de sólidos solúveis utilizando o refratômetro apresentou uma dificuldade adicional quando comparada com a análise em HPLC-IR. A leitura do conteúdo de sólidos foi dificultada a partir do tempo de processamento de 8 horas, uma vez que a amostra encontrava-se muito seca (com umidade em base seca de aproximadamente 1,05 g de água por g de sólidos secos) e, por isso, a obtenção de suco a partir da amostra para a realização da leitura em refratômetro era restrita. No entanto, isso não representa uma limitação à utilização deste equipamento, uma vez que é possível realizar a diluição das amostras anteriormente à leitura e converter o valor lido no refratômetro conforme o fator de diluição utilizado. Além disso, a utilização de refratômetros mais modernos do que aquele usado durante a realização do presente trabalho possibilita a determinação do conteúdo de sólidos solúveis em materiais líquidos, pastosos e até mesmo sólidos (independentemente da coloração e do teor de umidade das amostras) devido à localização dos prismas e espelhos presentes nesses equipamentos e pelo acoplamento de fonte de luz de LED (*Light Emitter Diode*).

4.3.4. Determinação da difusividade mássica efetiva para a sacarose

A metodologia de cálculo utilizada para a determinação da difusividade mássica efetiva da sacarose na *physalis* foi a mesma descrita anteriormente para a determinação da difusividade mássica efetiva da água. A determinação do conteúdo de açúcar incorporado nas amostras de *physalis* ao longo do processo de desidratação osmótica foi realizada utilizando a técnica cromatográfica. O conteúdo de açúcar no equilíbrio foi determinado através da mesma metodologia descrita anteriormente para o conteúdo de água; os dados estão apresentados na Tabela 19. Nas condições experimentais de temperatura de 40 °C, independente da concentração da solução osmótica, não houve incorporação de sólidos suficiente que permitisse a obtenção dos valores de conteúdo de açúcar no equilíbrio, impossibilitando a determinação da difusividade mássica efetiva para a sacarose nessas condições experimentais.

Tabela 19. Conteúdo de açúcar no equilíbrio (x_{∞}^{sac}) e os respectivos coeficientes de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.

Experimento	Temperatura (°C)	Concentração da solução (°Brix)	x_{∞}^{sac}	R ²
4	70	40	0,286	0,914
13	70	40	0,216	0,999
2	70	70	0,436	0,996
9	70	70	0,446	0,982
16	70	70	0,342	0,902
6	55	55	0,208	0,935
7	55	55	0,243	0,917
8	55	55	0,277	0,998
11	55	55	0,286	0,939
14	55	55	0,285	0,996

Semelhante à metodologia utilizada para determinar a difusividade mássica efetiva da água, a solução da Segunda Lei de Difusão de Fick (levando em consideração os cinco primeiros termos da série) foi usada para determinar a difusividade mássica efetiva da sacarose e os resultados estão apresentados na Tabela 20. Todos os coeficientes de determinação (R²) apresentaram valores superiores a 0,9 e, portanto, os modelos podem ser considerados satisfatórios.

Tabela 20. Difusividade mássica efetiva para a sacarose ($D_{ef}^{sac} \cdot 10^{10}$) em m² s⁻¹ e o coeficiente de determinação para as diferentes condições experimentais de desidratação osmótica de physalis.

Temperatura (°C)	Concentração da solução (°Brix)	Média ± desvio padrão x 10 ¹⁰ (m ² s ⁻¹)	R ²
70	40	2,76 ± 0,64 ^a	0,962
70	70	3,20 ± 1,08 ^a	0,973
55	55	2,13 ± 0,28 ^a	0,947

^a, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p > 0,05).

Conforme se observa na Tabela 20, os resultados obtidos para a difusividade mássica efetiva da sacarose encontraram-se na faixa de $2,13 - 3,20 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Esses dados foram analisados estaticamente utilizando o Teste de Tukey e verificou-se que os valores encontrados não diferem estaticamente ($p > 0,05$).

Os estudos de desidratação de physalis encontrados na literatura utilizaram ar quente durante o processo de secagem convectivo e por este motivo somente a difusividade mássica efetiva da água foi calculada. Portanto, não foram encontrados dados de difusividade mássica efetiva do soluto (neste caso, a sacarose) durante o processo de desidratação osmótica de physalis na literatura para comparar com os valores encontrados neste estudo. No entanto, há trabalhos que apresentam a difusividade mássica efetiva para outras frutas, destacando-se o trabalho de Azoubel & Murr (2004) com tomates cereja, Khoiy & Hesari (2007) com damascos e Silva *et al.* (2012) com acerolas. É possível verificar que os valores encontrados no presente trabalho são comparáveis àqueles descritos nos estudos anteriormente citados.

Azoubel & Murr (2004) determinaram a difusividade mássica efetiva do sal desidratando tomates cereja em soluções osmóticas ternárias (compostas de sacarose e sal), na temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, com agitação constante de 70 rpm, a razão de fruta e solução de 1:10, e encontraram valores variando entre $0,4$ e $5,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Khoiy & Hesari (2007) calcularam a difusividade mássica efetiva da sacarose usando o modelo de Fick e os resultados variaram entre $7,69$ e $31,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para damascos desidratados osmoticamente.

Silva *et al.* (2012) obtiveram valores de difusividade mássica efetiva da sacarose variando entre $2,78$ e $8,42 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para amostras de acerola osmoticamente desidratadas durante 24 h, em uma razão de solução: amostra de 3:1, usando uma solução de sacarose de $60 \text{ }^\circ\text{Brix}$.

Esta variabilidade nos valores da difusividade mássica efetiva ocorre uma vez que a sua determinação possui forte dependência com as condições experimentais, os procedimentos e métodos de cálculo utilizados, bem como com os métodos de tratamento de dados, as propriedades do produto, sua composição, seu estado fisiológico, e a relação entre a homogeneidade e heterogeneidade da estrutura da fruta.

4.4. Análise de Carotenoides Totais

O resultado da quantificação de carotenoides totais da *physalis in natura* foi realizado anteriormente aos 18 experimentos realizados e obteve-se uma variação de 220 a 285 μg por g de amostra (em base seca). Ou seja, todas as amostras *in natura* analisadas anteriormente ao processo de desidratação osmótica apresentaram em média 255 ± 21 μg por g de amostra (em base seca) com um coeficiente de variação de 8,2 %. Outros autores também encontraram valores dessa mesma ordem de grandeza para a *physalis*. Puente *et al.* (2011) encontraram valores variando entre 144 e 1460 μg de carotenoides por g de fruta em base úmida, enquanto Ramadan & Moersel (2004) encontraram aproximadamente 160 μg de carotenoides por g de fruta, em base seca.

Essa variação no conteúdo de carotenoides totais presentes em frutas é influenciada pela variedade da fruta, pelo seu grau de maturação, pelas suas condições de cultivo e pela estação do ano na qual as frutas são produzidas. As condições de colheita e de armazenamento também podem alterar o conteúdo de carotenoides, tanto qualitativa quanto quantitativamente, pela conversão da sua forma *trans* em *cis* e, também, por degradação (RODRIGUEZ-AMAYA, 2000), visto que estes pigmentos são instáveis à presença de luz, calor, metais e oxigênio, condições muitas vezes presentes no período entre a colheita e o consumo final (RODRIGUEZ-AMAYA, 1997).

A Tabela 21 apresenta a razão entre o conteúdo de carotenoides da *physalis* após 10 horas de processamento e das amostras de *physalis in natura* para todas as condições experimentais investigadas no presente trabalho e a análise estatística desses dados. Conforme pode ser observado, as maiores perdas de carotenoides totais, expressos em all-*trans*- β -caroteno, cerca de 50 %, ocorreram nos experimentos realizados na maior temperatura (70 °C); na condição experimental do ponto central, ou seja, na temperatura intermediária (55 °C), houve uma perda de carotenoides intermediária (aproximadamente 28 %). Além disso, é possível verificar que na temperatura de 40 °C, independente da concentração de sacarose utilizada na solução osmótica, o processo de desidratação osmótica de *physalis* após 10 horas, não apresentou perdas no conteúdo de carotenoides totais em relação ao conteúdo inicial. No Apêndice E são apresentados os resultados não normalizados para a análise de carotenoides totais para todas as condições experimentais.

Tabela 21. Razão entre o conteúdo de carotenoides da *physalis* após 10 horas de processamento e das amostras *in natura* para cada condição experimental.

Temperatura da solução (°C)	Concentração de sacarose (°Brix)	Carotenoides (t_f) / Carotenoides (t_0) média \pm desvio padrão
40	40	1,11 \pm 0,01 ^a
40	70	1,10 \pm 0,09 ^a
55	55	0,72 \pm 0,05 ^b
70	40	0,57 \pm 0,04 ^c
70	70	0,50 \pm 0,06 ^c

^a, ^b, ^c, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

No estudo realizado por Tonon, Baroni & Hubinger (2007) foi avaliado o conteúdo de carotenoides totais, expressos em licopeno, devido ao processo de desidratação osmótica de tomates (variedade *Deborah*) cortados em metades, usando soluções ternárias (NaCl e sacarose) e temperatura variando entre 20 e 40 °C. Neste estudo, o conteúdo de carotenoides totais presentes inicialmente na fruta foi preservado mesmo após 6 horas de processamento. Esse resultado está de acordo com os dados obtidos no presente trabalho para a temperatura de 40 °C.

Sanjinez-Argandoña *et al.* (2005) verificaram uma redução de aproximadamente 12 % do conteúdo de carotenoides totais (6,01 para 5,34 mg por 100 g de fruta) em metades de goiabas (*Psidium guajava* L.) previamente descascadas, cultivar *Paluma*, que foram submetidas ao processo de desidratação osmótica durante 2 horas, na temperatura de 40 °C e com concentração da solução osmótica de 60 °Brix. A seguir, as amostras osmoticamente desidratadas foram submetidas à secagem utilizando ar quente por 4 horas, na temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 1 m s⁻¹ e a perda de carotenoides após esse processamento foi de aproximadamente 44 %. Além disso, os autores verificaram que a perda de carotenoides foi muito mais pronunciada quando as amostras foram secas utilizando ar quente sem o pré-tratamento de desidratação osmótica (aproximadamente 75 %); o aumento na perda deste composto, segundo os autores, poderia estar relacionado aos danos causados no tecido celular das goiabas provenientes principalmente da elevada temperatura de secagem, maior exposição ao oxigênio e da baixa umidade relativa do ar de secagem, aumentando a taxa de degradação deste pigmento.

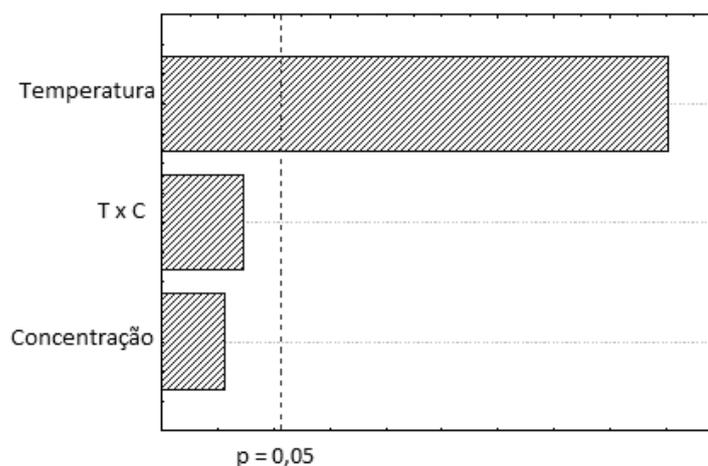
Utilizando o software STATISTICA foram calculados os efeitos das variáveis temperatura e concentração da solução osmótica e da sua interação, assim como a significância estatística (valor de p) e os resultados estão apresentados na Tabela 22. Através da análise dessa tabela é possível verificar que a concentração da solução osmótica não apresentou influência significativa na quantidade de carotenoides totais após o processamento. Por outro lado, a variável temperatura apresentou influência significativa ($p < 0,05$) sobre a análise deste composto, indicando que quanto maior a temperatura, menor a concentração de carotenoides presentes nas amostras após o processamento consequentemente, maior a perda deste composto devido ao processo. O efeito combinado das variáveis temperatura e concentração da solução osmótica não apresentou efeito significativo sobre a perda de carotenoides. Essas conclusões são corroboradas pela análise do Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 27.

Tabela 22. Magnitude dos efeitos dos fatores sobre a análise de carotenoides totais.

Fatores	Efeitos estimados	p valor
Termo independente	0,762	< 0,001*
Temperatura (T)	-0,496	< 0,001*
Concentração da solução (C)	-0,008	0,859
T x C	-0,029	0,515

*significativo ($p < 0,05$)

Figura 27. Diagrama de Pareto para a análise de carotenoides.



A Tabela 23 apresenta a análise de variância (ANOVA) realizada no *software* STATISTICA para a análise dos dados de carotenoides totais devido ao processo de

desidratação osmótica de physalis e os resultados demonstraram que o modelo apresentou uma regressão significativa, uma vez que o valor de $F_{\text{calculado}}$ é superior ao valor de F_{tabelado} . O coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo foi de 0,920, indicando que o modelo explicou 92 % da variação dos dados observados.

Tabela 23. Análise de variância da significância da regressão do modelo para previsão dos dados de perda de carotenoides durante o processo de desidratação osmótica de physalis.

Fator	SQ	GL	MQ	F_{calculado}	F_{tabelado}
Regressão	0,539	1	0,539	148,75	4,67
Resíduos (Erro)	0,047	13	0,004		
Total	0,587	14			$R^2 = 0,920$

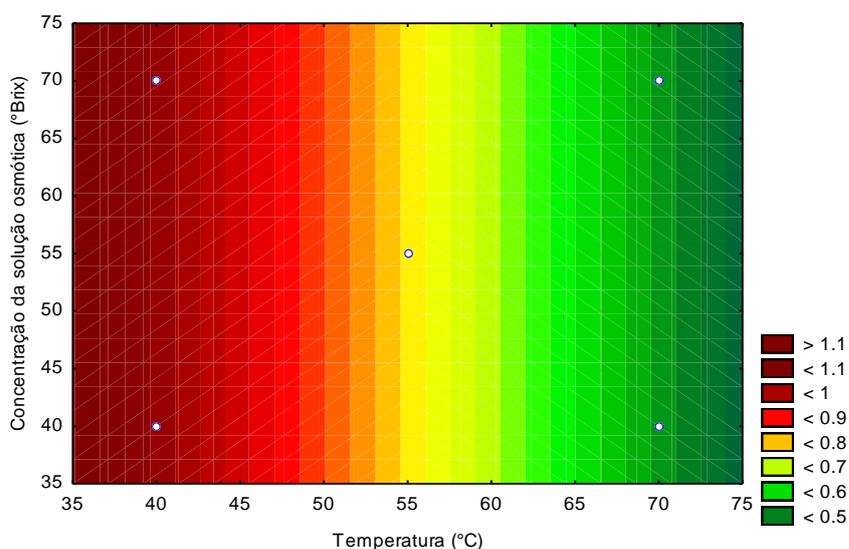
É possível verificar que os dados foram validados pela ANOVA, mostrando que o modelo se ajusta muito bem aos dados experimentais. Desta forma, o modelo codificado proposto para representar a perda de carotenoides durante o processo de desidratação osmótica de physalis pode ser representado pela Equação (26):

$$\frac{\text{Carotenoides}_{(t)}}{\text{Carotenoides}_{(0)}} = 0,762 - 0,248 \cdot x_1 \quad (26)$$

Em que x_1 representa a temperatura da solução osmótica.

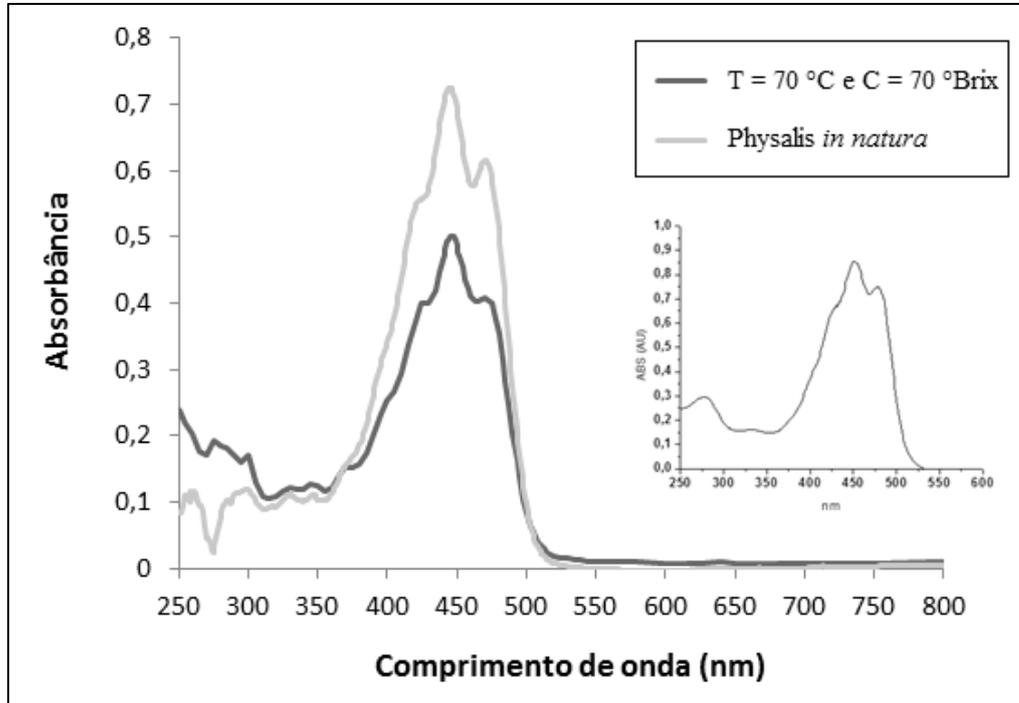
A Figura 28 apresenta as linhas de contorno para a análise de carotenoides totais em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis. A análise desta figura revela que quanto menor a temperatura, maior a concentração de carotenoides presentes na amostra (região vermelha do gráfico) após o processamento, e, portanto, menor é a perda deste composto devido ao processo de desidratação osmótica; à medida que a temperatura de processamento aumenta (região verde do gráfico) tem-se uma redução da concentração deste composto, indicando que, nas temperaturas mais altas de processamento, houve uma maior perda desse composto durante o processo de desidratação osmótica de physalis. As linhas verticais indicam que a variável concentração da solução osmótica e a interação entre as variáveis temperatura e concentração da solução osmótica não influenciaram na perda de carotenoides, conforme discutido anteriormente.

Figura 28. Linhas de contorno para a perda de carotenoides em função da temperatura e da concentração de sacarose para o processo de desidratação osmótica de physalis.



A Figura 29 apresenta o espectro UV-visível dos extratos de carotenoides da physalis *in natura* e da physalis submetida ao processo de desidratação osmótica por 10 horas na condição mais extrema de processamento, temperatura de 70 °C e concentração de solução osmótica a 70 °Brix. Conforme pode ser observado, ocorreu um efeito hipocrômico devido à diminuição do teor de carotenoides totais no final do processamento em relação ao conteúdo inicialmente presente na physalis. Entretanto, não foi verificada a ocorrência de deslocamento hipsocrômico (deslocamento para menores comprimentos de ondas), o que indicaria a formação de elevada quantidade de compostos de degradação - por exemplo, compostos com isomeria *cis*- β -carotenos, epóxidos e apocarotenoides - uma vez que, tanto a amostra *in natura*, quanto a amostra de physalis após o processamento apresentaram comprimento de onda máximo em 450 nm. De acordo com a Figura 29 é possível verificar que os extratos de physalis apresentaram o perfil do espectro UV-Visível semelhante ao espectro do padrão *all-trans*- β -caroteno, corroborando o estudo de De Rosso & Mercadante (2007) onde foi demonstrado que o *all-trans*- β -caroteno é o carotenoide majoritário presente na physalis (correspondendo a 76,8 %).

Figura 29. Espectro UV-visível do extrato de carotenoides da *physalis in natura* e do extrato de *physalis* após 10 horas de desidratação osmótica na temperatura de 70 °C e concentração de sacarose de 70 °Brix, e espectro do padrão all-*trans*- β -caroteno.



4.5. Análise Microestrutural (MEV)

O processo de desidratação osmótica é conhecido por promover alterações na estrutura de vegetais uma vez que durante o processamento ocorre a migração da água da fruta em direção à solução osmótica, enquanto a sacarose se move para dentro dos espaços intercelulares da fruta, devido ao gradiente de pressão osmótica existente (FERNANDES, RODRIGUES & GASPARETO, 2006; NOWACKA *et al.*, 2014). Este fenômeno de transferência de massa em contracorrente pode levar a danos nas estruturas celulares ao nível microscópico. As Figuras 30 e 31 apresentam a análise microestrutural das amostras de *physalis in natura* e após 10 horas de desidratação osmótica (na condição de temperatura e concentração da solução osmótica de 70 °C e 70 °Brix), respectivamente, com um corte transversal à superfície da amostra a fim de obter a análise microscópica da área do pedúnculo e da região próxima a este. Enquanto que no Apêndice F é possível verificar o aspecto físico das amostras de *physalis in natura* e após 10 horas de desidratação osmótica nessa mesma condição experimental (temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix).

Figura 30. Micrografia de um corte transversal junto da região do pedúnculo da physalis *in natura* nas magnitudes de 50 e 180 vezes, respectivamente, obtida através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

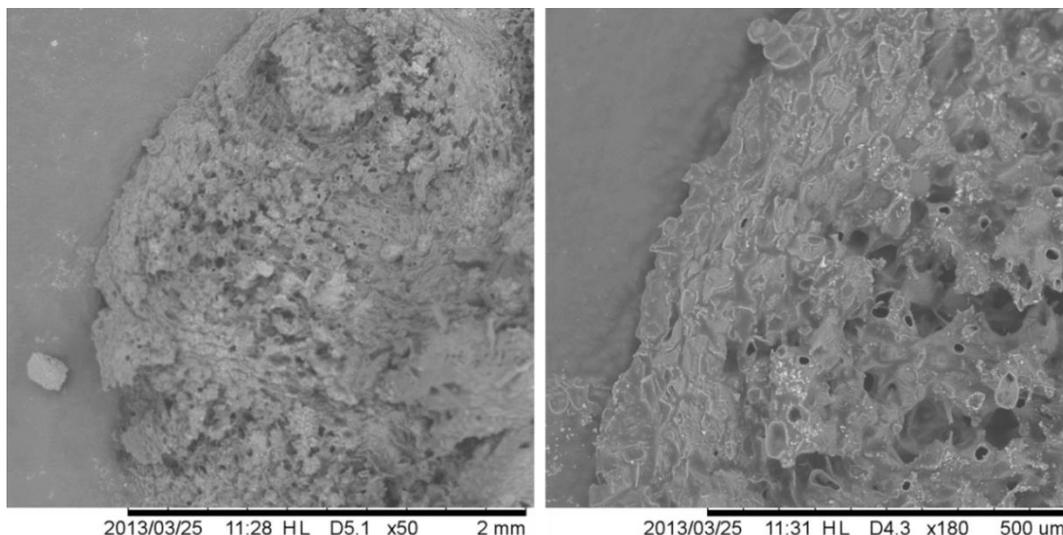
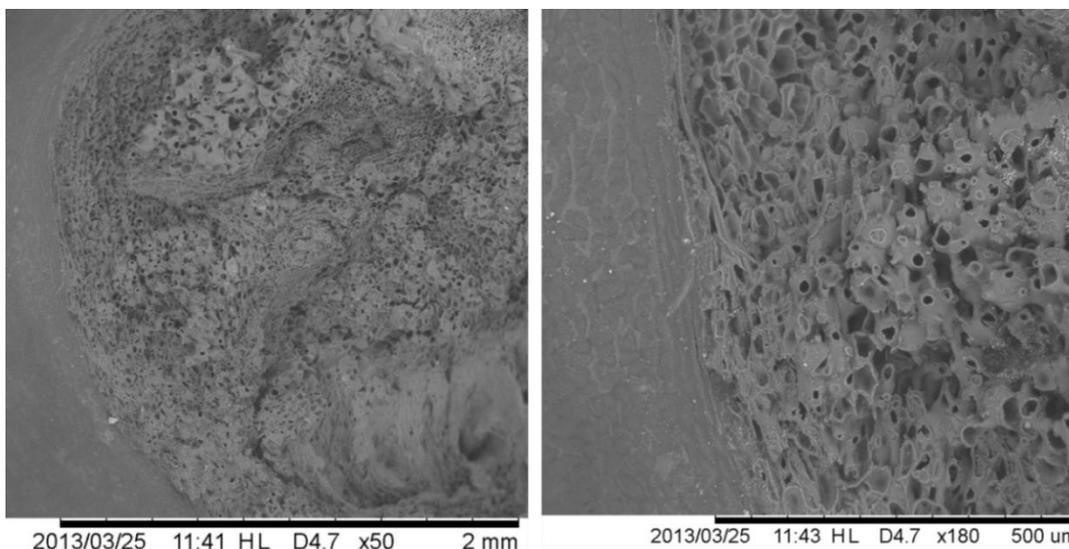


Figura 31. Micrografia de um corte transversal junto da região do pedúnculo da physalis após 10 horas de processamento via desidratação osmótica na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix na magnitude de 50 e 180 vezes, respectivamente, obtida através de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



A comparação das micrografias da amostra de physalis *in natura* e da amostra após o processamento de desidratação osmótica permite identificar uma diferença na quantidade de espaços intercelulares para cada situação. Após o processo de desidratação verifica-se um aumento considerável da quantidade de poros presentes na superfície do tecido celular na região próxima ao pedúnculo da physalis; na amostra desidratada é possível verificar a

presença de ranhuras (estiramento) na película da casca sugerindo que, nesta condição experimental, o processo de desidratação osmótica promove uma modificação na estrutura da physalis. Este resultado está de acordo com o obtido por Fernandes, Rodrigues & Gaspareto (2006) para mamão, Fernandes, Gallão & Rodrigues (2008) para o melão e Nowacka *et al.* (2014) para kiwi.

4.6. Análise Colorimétrica

Os parâmetros de cor, L^* , a^* , b^* , C_{ab}^* e h_{ab} (escala CIELAB), das amostras *in natura* e das amostras de physalis após 10 horas de desidratação osmótica, segundo as condições experimentais avaliadas no presente estudo, foram comparados através de testes estatísticos utilizando o software Excel (versão 7.0, Microsoft). Os resultados da análise estatística dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C_{ab}^* e h_{ab}) estão apresentados no Apêndice G. Primeiramente, foi realizado o teste-F (a fim de garantir variâncias equivalentes entre as amostras) e, em seguida, foi feito o Teste-t (comparação entre médias), permitindo verificar que não houve diferença significativa, ao nível de confiança de 95 %. Por esta razão optou-se por apresentar e discutir somente os resultados de diferença global da cor (ΔE^*), os quais são calculados relacionando as amostras de physalis *in natura* e as physalis submetidas ao processo de desidratação osmótica durante 10 horas em cada uma das condições do planejamento experimental. Os valores de ΔE^* estão apresentados na Tabela 24 e variaram de 0,97 até 2,09; esse resultado indica que a diferença global de cor encontrada no presente trabalho é aceitável, uma vez que os valores são inferiores a 3,0 (LEE & COATES, 1999). A análise estatística dos dados de diferença global de cor realizada utilizando o Teste de Tukey também está apresentada na Tabela 24, é possível verificar que, independente do tratamento, os resultados são estatisticamente iguais, e não diferem entre si ($p > 0,05$).

Segundo Ribeiro & Seravalli (2004), o processamento de alimentos pode provocar a isomerização das moléculas de carotenoides e, assim, promover uma ligeira mudança na coloração final dos produtos. No presente trabalho, através da análise colorimétrica realizada foi possível verificar que todos os valores de diferença global de cor (ΔE^*) calculados obtiveram valores próximos a 2,0, indicando que, mesmo após 10 horas de desidratação osmótica, nas condições de temperatura e concentração da solução osmótica utilizadas no presente trabalho, as amostras de physalis não apresentaram diferença global de cor visualmente perceptível.

Tabela 24. Resultados de diferença global de cor (ΔE^*) entre as amostras de physalis *in natura* e das amostras após o processo de desidratação osmótica.

Temperatura (°C)	Concentração de sacarose (°Brix)	ΔE^* (média \pm desvio padrão)
40	40	1,26 \pm 0,22 ^a
40	70	1,20 \pm 0,38 ^a
70	40	0,97 \pm 0,22 ^a
55	55	1,86 \pm 0,34 ^a
70	70	2,09 \pm 0,29 ^a

^a, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p > 0,05$).

Sadilova, Carle & Stintzing (2007) destacam que um valor de ΔE^* igual a 1,0 já é perceptível ao olho humano, sendo suficiente para produzir uma mudança de cor visível; Melgosa *et al.* (2001) apresentam parâmetros mais flexíveis, baseados na perspectiva industrial, com valores de diferença global de cor variando entre 1,1 e 2,8 sendo considerados totalmente aceitáveis. Além disso, quando os valores variam entre 2,8 e 5,6, pode-se considerar que é uma variação regular, enquanto que valores de ΔE^* superiores a 5,6 unidades CIELAB são considerados inaceitáveis. Pode-se citar também que, de acordo com Lee & Coates (1999), valores de ΔE^* próximos a 2 não representam uma diferença global de cor visivelmente notável ao olho humano e valores de ΔE^* superiores a 3 são considerados inaceitáveis para muitos produtos.

Lee & Coates (1999) avaliaram os efeitos da pasteurização na mudança de cor de 15 amostras de sucos de frutas vermelhas. O processo de pasteurização do suco consistiu em aquecê-lo até 91 °C na taxa de 3,8 L min⁻¹ (aproximadamente 10 segundos) usando um trocador de calor de placas seguido por um resfriamento rápido até 25 °C. Em todos os sucos testados, o valor de ΔE^* encontrado foi superior a 2,0 (variando de 2,5 a 4,8). Além disso, 4 das 15 amostras testadas apresentaram valores de ΔE^* superiores a 3,0 (alteração visual inaceitável) após o processamento.

Em outro estudo, Lee & Coates (2003), tiveram como objetivo avaliar a perda de pigmentos e possíveis alterações de cor associadas com a pasteurização térmica do suco de laranja Valencia. O suco foi aquecido a 90 °C por 30 segundos e, em seguida foi realizado um rápido arrefecimento em banho de gelo. A análise de cor foi conduzida em um

espectrofotômetro e a análise dos carotenoides foi realizada por HPLC com detector de arranjo de diodos. O conteúdo total de pigmentos para os sucos frescos, expresso pela soma da concentração de carotenoides ($\lambda=450$ nm), foi de $6,25 \pm 0,11$ mg L⁻¹ e após o processo de pasteurização, o conteúdo total de pigmentos dos sucos diminuiu para $5,70 \pm 0,08$ mg L⁻¹, representando uma perda de aproximadamente 10%. Além disso, a diferença global de cor entre os sucos frescos e os sucos pasteurizados, expressa por ΔE^* , foi de $2,92 \pm 0,98$. Esse valor de diferença global de cor tem sido considerado (FRANCIS & CLYDESDALE, 1975; LEE & COATES, 1999) inaceitável, uma vez que permite que uma diferença visual seja percebida pelo olho humano.

Sadilova, Carle & Stintzing (2007) avaliaram o processo de purificação de antocianinas presentes em cenouras pretas e morangos usando aquecimento (na temperatura de 95 °C) em diferentes tempos (variando entre 0,5 e 6 horas). Os resultados deste estudo demonstraram que, após o aquecimento, houve uma diminuição da atividade antioxidante das amostras e uma elevada perda de coloração devido à exposição térmica. Além disso, a diferença global de cor (ΔE^*) após o processamento foi mais alta em cenouras pretas (ΔE^* variando de 7,25 a 32,84) do que nos morangos (ΔE^* variando entre 2,32 e 17). Os resultados demonstraram que até mesmo o menor tempo de aquecimento (30 minutos) utilizado foi suficiente para produzir uma mudança de cor visível.

4.7. Viscosidade das Soluções Osmóticas

A viscosidade dinâmica média das soluções osmóticas de sacarose (nas concentrações de 40, 55 e 70 °Brix) foi determinada anteriormente ao processo de desidratação osmótica através do procedimento descrito na Seção 3.10 e os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Viscosidade dinâmica (N s m^{-2}) das soluções de sacarose nas respectivas temperaturas de operação (temperatura da solução osmótica de sacarose na qual foi realizado o experimento).

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Concentração da solução ($^{\circ}\text{Brix}$)	Viscosidade dinâmica (N s m^{-2})
40	40	$0,29 \cdot 10^{-2}$
70	40	$0,14 \cdot 10^{-2}$
55	55	$0,68 \cdot 10^{-2}$
40	70	$55,9 \cdot 10^{-2}$
70	70	$4,88 \cdot 10^{-2}$

Conforme pode ser observado através da análise dos resultados apresentados na Tabela 25, para uma mesma concentração de sólidos da solução osmótica, quanto maior a temperatura, menores são as viscosidades calculadas, enquanto para uma mesma temperatura, quanto maior a concentração de sacarose da solução osmótica, maiores são as viscosidades dinâmicas calculadas, conforme era esperado.

A transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica depende de vários fatores, destacando-se, entre eles, a concentração da solução osmótica. De acordo com Nabetani *et al.* (1992) a principal propriedade física associada à concentração do meio osmótico é a viscosidade, uma vez que exerce influência sobre a potência de agitação requerida (modificando o aspecto econômico), e sobre a taxa de transferência de massa. Quando o meio osmótico é altamente viscoso, o transporte de massa global deve ser estudado como transporte em duas fases (fases líquida e sólida). Por esta razão, a suposição comumente utilizada de que a resistência à transferência de massa externa é desprezível, nem sempre é válida. Além disso, propriedades físicas como a viscosidade de soluções de sacarose só estão disponíveis em manuais na temperatura de 20°C , e para outras temperaturas poucos dados estão disponíveis na literatura.

Galmarini *et al.* (2011) mediram a viscosidade de soluções de sacarose usando um viscosímetro de rotação Brookfield. As soluções osmóticas de sacarose apresentaram um comportamento de fluido newtoniano, sendo a viscosidade independente da taxa de cisalhamento. Além disso, a viscosidade das soluções de sacarose aumentou de forma exponencial com o aumento da concentração. A viscosidade dinâmica de uma solução de

sacarose 40 % (40 g de sacarose por 100 g de solução), na temperatura de 34 °C, foi de 0,004 N s m⁻², valor próximo ao encontrado no presente trabalho.

4.8. Atividade de Água (a_w)

O processamento de frutas por desidratação osmótica promove uma redução da sua atividade de água, a_w , minimizando o conteúdo de água disponível para o desenvolvimento e crescimento de microrganismos no produto final, promovendo, portanto, um aumento da vida de prateleira da fruta. Puente *et al.* (2011) relatam valores de atividade de água para a *Physalis peruviana* L. *in natura* variando entre 0,985 e 0,989, coerente com o valor encontrado no presente trabalho, e também com outras frutas, entre elas, mirtilo (Stojanovic & Silva, 2007), tomate (HEREDIA, BARRERA & ANDRÉS, 2007), toranja (MORAGA, MORAGA & MARTÍNEZ-NAVARRETE, 2011) e morango (NUÑES-MANCILLA *et al.*, 2013).

Os resultados da análise de atividade de água das amostras *in natura* e das physalis após o processo de desidratação osmótica, durante 10 horas, nas diferentes condições testadas estão apresentados na Tabela 26. Todas as medidas de atividade de água foram realizadas na temperatura de 25 °C. É possível observar que somente a condição de temperatura de 70 °C e concentração da solução de 70 °Brix apresentou uma redução estatisticamente significativa (o valor do p foi inferior a 0,05) no valor da atividade de água após 10 horas de processamento via desidratação osmótica.

Tabela 26. Atividade de água das amostras de physalis *in natura* e após a realização do processo de desidratação osmótica para cada condição do planejamento experimental.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (° Brix)	Physalis (t = 0 h) Média ± desvio padrão	Physalis (t = 10 h) Média ± desvio padrão	p valor
40	40	0,978 ± 0,004 ^a	0,979 ± 0,001 ^a	0,55
40	70	0,975 ± 0,004 ^a	0,979 ± 0,006 ^a	0,62
70	40	0,973 ± 0,001 ^a	0,967 ± 0,006 ^a	0,38
55	55	0,973 ± 0,003 ^a	0,969 ± 0,007 ^a	0,96
70	70	0,975 ± 0,006 ^a	0,872 ± 0,005 ^b	< 0,001*

*é significativo (p < 0,05);

^a, ^b, letras iguais na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey (p < 0,05).

Tonon, Baroni & Hubinger (2007) avaliaram a influência da temperatura (20 - 40 °C), da composição da solução osmótica (soluções ternárias de açúcar e sal comerciais) e a velocidade de agitação sobre o processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica de metades de tomates durante 6 horas e obtiveram, após o processamento, produtos com elevada atividade de água (a_w). O processo de desidratação osmótica pode ser considerado um método eficiente que mantém a qualidade do produto, no entanto, o produto final obtido não pode ser considerado um produto comercialmente estável e requer etapas posteriores a fim de aumentar sua estabilidade, tais como secagem por ar quente ou congelamento.

Além de ser um indicativo da estabilidade microbiológica dos produtos finais obtidos após determinado processamento de frutas, a força motriz do processo de desidratação osmótica caracteriza-se como a diferença de pressão osmótica entre a solução e a fruta, podendo ser expressa através da diferença de atividade de água (a_w). Esta consideração pode ser feita porque o processo de desidratação osmótica envolve essencialmente dois tipos de transferência de massa, ou seja, a difusão de água do alimento para a solução osmótica e a difusão do soluto da solução osmótica para o alimento. No primeiro, a força motriz da transferência de massa é a diferença de pressão osmótica, enquanto que no segundo, a força motriz para que ocorra a transferência de massa é a diferença de concentração. Na Tabela 27 são apresentados os valores de atividade de água para as amostras de *physalis in natura* e para as soluções osmóticas utilizadas durante a parte experimental.

A força motriz do processo de desidratação osmótica é a diferença de pressão osmótica entre a solução e a fruta, podendo ser expressa através da diferença de atividade de água (a_w). Na Tabela 27 são apresentados os valores médios de atividade de água para as amostras de *physalis in natura* e para as soluções osmóticas utilizadas durante a parte experimental.

Tabela 27. Atividade de água das amostras de *physalis in natura* e das soluções osmóticas utilizadas durante os experimentos de desidratação osmótica (todas as medidas foram realizadas na temperatura de 25 °C).

	Atividade de água (a_w) média \pm desvio padrão
Physalis in natura	0,975 \pm 0,004
Solução osmótica 40 °Brix	0,948 \pm 0,007
Solução osmótica 55 °Brix	0,910 \pm 0,008
Solução osmótica 70 °Brix	0,836 \pm 0,028

Sereno *et al.* (2001) realizaram um estudo de predição da atividade de água de diferentes soluções osmóticas, encontrando valores muito próximos daqueles determinados neste estudo. Para solução 40 % de sacarose, encontraram atividade de água de 0,96. Para a solução 55 % de sacarose encontraram 0,92 de atividade de água enquanto que para a solução osmótica 70 % de sacarose valores de atividade de água próximos a 0,82.

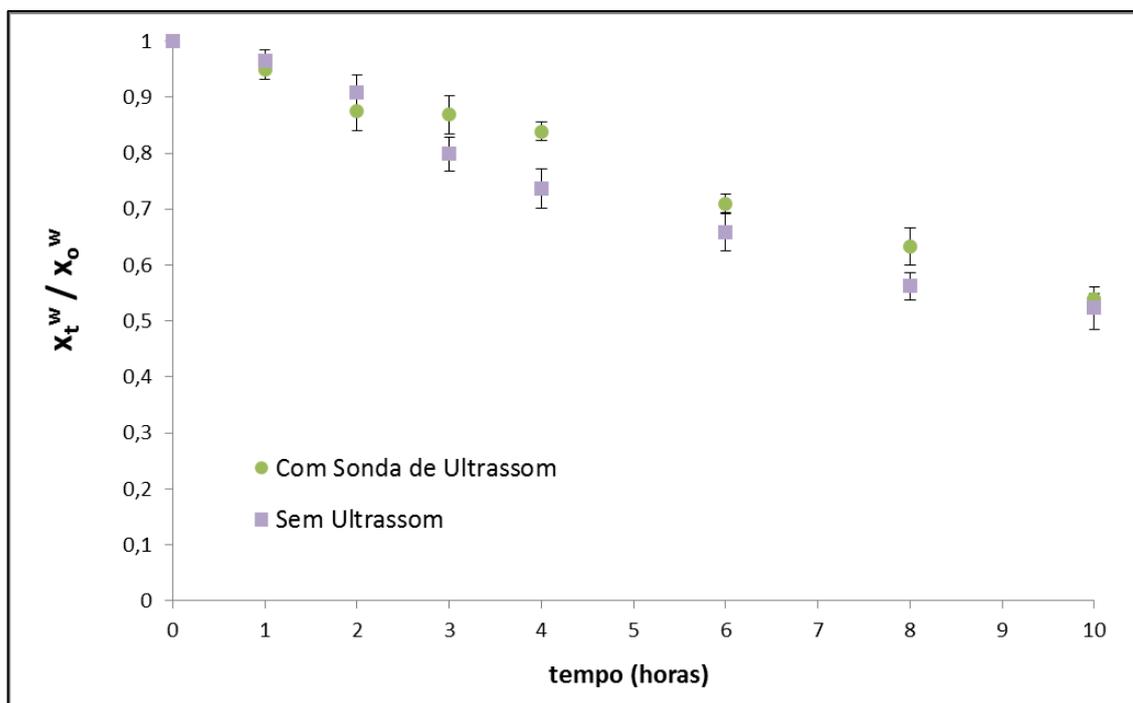
Analisando os dados apresentados na Tabela 27 é possível verificar que a diferença de valores de atividade de água entre a *physalis in natura* e a solução osmótica de 40 °Brix (contendo 40 g de sacarose por 100 g de solução) é muito pequena, o que justifica os pequenos ganhos de sólido e perda de água durante o processo de desidratação osmótica nessa condição experimental. Para as outras condições experimentais - concentração da solução osmótica de 55 e 70 °Brix - o gradiente de força motriz, expresso pela diferença de atividade de água, foi tal que permitiu uma desidratação satisfatória; a maior diferença entre os valores de a_w foi para a solução osmótica com 70 °Brix que, de fato, foi à condição experimental que conduziu às maiores perdas de água durante o processo de desidratação osmótica. Não foram encontrados na literatura trabalhos de desidratação osmótica que analisem a atividade de água das amostras e das soluções osmóticas envolvidas, impedindo a realização de uma comparação de dados.

4.9. Uso da Sonda de Ultrassom como Pré-tratamento

A Figura 32 apresenta os resultados encontrados para a variação de perda de água durante o processamento da *physalis* por 10 horas, na condição de temperatura de 55 °C e

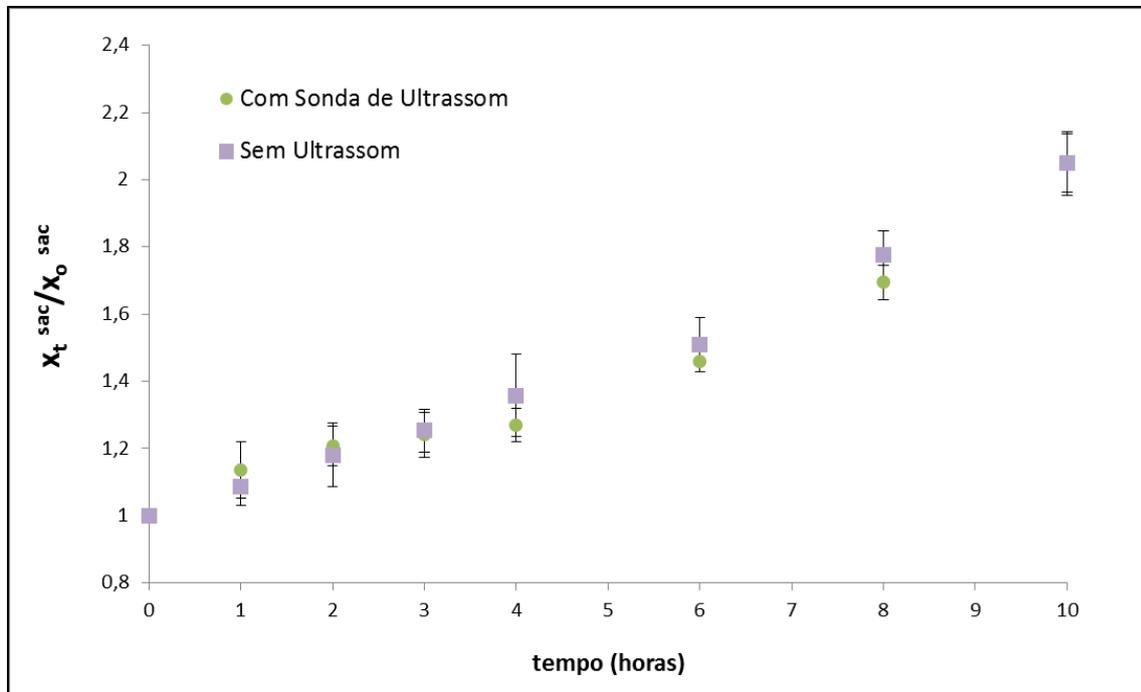
concentração da solução osmótica de 55 °Brix, com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento (durante 30 minutos, frequência de 20 KHz e amplitude de 80 %) em função do tempo de desidratação osmótica. A metodologia utilizada para calcular a perda de água e o ganho de solutos, assim como o cálculo da difusividade mássica efetiva da água foram os mesmos descritos anteriormente.

Figura 32. Variação da perda de umidade normalizada com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica em função do tempo de imersão.



A Figura 33 apresenta os resultados encontrados para a variação do ganho de sólidos (dados obtidos pela análise de açúcares em HPLC) durante o processamento da physalis por 10 horas, com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento em função do tempo de imersão no banho de desidratação osmótica.

Figura 33. Variação do ganho de sólidos normalizado, expresso em glicose, obtido através da análise de açúcares no HPLC, com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica em função do tempo de imersão.



A análise das Figuras 32 e 33 revela que o comportamento e os valores obtidos, tanto para a perda de água quanto para o ganho de sólidos, para os dois processos (com e sem a utilização da sonda de ultrassom) são muito semelhantes, estando, inclusive, para alguns tempos de análise, sobrepostos. Este fato indica que o uso do ultrassom não promove modificações suficientes nas physalis que permitam influenciar na perda de água ou no ganho de açúcares durante o processo de desidratação osmótica.

A Tabela 28 apresenta os resultados encontrados para a perda de água, a difusividade mássica efetiva da água, o ganho de sólidos solúveis (utilizando o refratômetro), o ganho de açúcares (quantificado por HPLC-IR), o conteúdo total de carotenoides e a diferença global de cor ΔE^* após 10 horas de desidratação osmótica para os experimentos que tiveram um pré-tratamento com a sonda de ultrassom e para os experimentos realizados sem pré-tratamento. Nesta tabela, também são apresentados os valores da análise estatística (Teste-t).

Tabela 28. Perda de água, difusividade mássica efetiva da água, ganho de sólidos solúveis, ganho de açúcares, conteúdo de carotenoides totais e diferença global de cor (ΔE^*) para os experimentos com e sem a utilização de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica (após 10 horas de processamento).

	Média \pm desvio padrão		Teste-t
	Sem Ultrassom	Com sonda de ultrassom	p-valor
Perda de água - WL (%)	47,65 \pm 3,84	46,09 \pm 0,96	0,53
(D_{ef} da água) x10¹⁰ (m² s⁻¹)	3,24 \pm 0,49	2,34 \pm 0,11	0,08
Ganho de sólidos solúveis (°Brix)	1,989 \pm 0,075	1,807 \pm 0,312	0,38
Ganho de açúcares (HPLC-IR)	2,015 \pm 0,221	2,049 \pm 0,257	0,87
Carotenoides totais	0,739 \pm 0,039	0,785 \pm 0,063	0,34
ΔE^*	1,86 \pm 0,34	1,84 \pm 0,38	0,62

A média foi calculada a partir dos três experimentos realizados com o uso de sonda de ultrassom como pré-tratamento.

A fim de verificar o efeito do uso da sonda de ultrassom nos parâmetros analisados foi realizada uma análise estatística, utilizando o Software Excel 7.0 da Microsoft, através da realização do Teste-F, objetivando verificar as variâncias de duas amostras, seguida pelo Teste-t, de comparação de médias de duas amostras presumindo variâncias equivalentes. Através dessa análise estatística, é possível verificar que nenhum dos parâmetros analisados foi estatisticamente significativo (p-valor foi superior a 0,05) para o uso da sonda de ultrassom, dentro das condições testadas neste estudo: a temperatura e a concentração da solução osmótica, o tempo de imersão e a amplitude da sonda de ultrassom aplicada. A análise estatística dos dados de difusividade mássica efetiva da água permitiu verificar que esse parâmetro também não foi estatisticamente influenciado, nas condições testadas, pelo uso do pré-tratamento de sonda de ultrassom.

Diferentemente do resultado obtido no presente trabalho, Fernandes, Gallão & Rodrigues (2008) verificaram que cubos de melão (*Curcumis melo* L.), com 2 cm de lado, incorporaram umidade após terem sido submetidos, durante 30 minutos, ao tratamento de ondas ultrassônicas (frequência de 25 kHz e intensidade de 4870 W m⁻², na temperatura de 30 °C, água destilada), aumentando aproximadamente 10 % de seu conteúdo de água em

relação ao valor inicial. A difusividade mássica efetiva da água calculada aumentou aproximadamente 40 % em relação ao experimento realizado sem a utilização do ultrassom. No entanto, não foi feita a análise estatística para comprovar o nível de significância deste aumento. Os autores mostraram que o uso do ultrassom induziu a mudanças na estrutura celular do melão, não houve rompimento de nenhuma célula e houve o aparecimento de canais microscópicos que podem ter sido os responsáveis pelo aumento na difusividade mássica da água devido à diminuição da resistência ao processo de difusão da água.

Nowacka *et al.* (2014) avaliaram o uso de um banho de ultrassom (frequência de 35 kHz, durante 10, 20 e 30 minutos) como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica (solução de sacarose de 61,5 %) de fatias de kiwis (10 mm de espessura) e observaram que a utilização de tempos superiores a 10 minutos apresentaram um efeito positivo sobre o processo de transferência de massa durante a desidratação osmótica; a aplicação do pré-tratamento de ultrassom promoveu uma maior formação de microcanais e um aumento da área de seção transversal média das células (avaliados por Ressonância Magnética Nuclear).

Simal *et al.* (1998) também avaliaram o processo de desidratação osmótica acoplado a um banho de ultrassom (frequência de 50 kHz e potência de 150 W), em diferentes temperaturas, utilizando cubos de maçã de 1 cm e solução de sacarose de 70 °Brix. Os resultados demonstraram que o uso do ultrassom aumentou a taxa de transferência de massa, tendo influenciado mais significativamente no aumento da difusividade mássica efetiva da sacarose do que na difusividade mássica efetiva da água. Segundo os autores, a aplicação do ultrassom promoveu a remoção do gás presente nesses poros, modificando a estrutura celular, fato que explica o aumento na difusividade mássica efetiva da água e da sacarose quando a sonicação é utilizada. Além disso, concluíram que o uso da tecnologia ultrassônica acoplada ao sistema de desidratação osmótica durante 3 horas na temperatura mais baixa (40 °C) estudada por eles apresentou a mesma perda de água do que o processo sem ultrassom na temperatura mais alta (70 °C). Portanto, o uso do banho de ultrassom permitiu obter taxas de perda de água e ganho de solutos mais elevados em temperaturas mais baixas, favorecendo a preservação do sabor natural dos alimentos e dos compostos nutracêuticos termosensíveis.

Os resultados apresentados na Tabela 28 mostraram que a utilização do ultrassom não acarretou em modificações na quantidade de carotenoides totais presentes na physalis após o processamento quando comparada à quantidade desse mesmo composto bioativo presente na

amostra após o processo de desidratação osmótica sem a utilização de pré-tratamento de ultrassom. Tal constatação pode estar relacionada, principalmente, ao fato de que carotenoides são compostos lipossolúveis, e, portanto, não migram facilmente para a solução osmótica. No trabalho realizado por Stojanovic & Silva (2007), a aplicação do ultrassom acoplado ao processo de desidratação osmótica (frequência constante de 850 kHz e aplicação de 580 mV de energia) promoveu uma maior perda de água em mirtilos (*Rabbiteye blueberries*) para a solução osmótica. No entanto, a utilização dessa tecnologia promoveu uma maior perda dos compostos bioativos dessa fruta (especialmente antocianinas), devido à lixiviação. Essa maior perda pode ser atribuída ao fato de que as antocianinas, que são compostos hidrossolúveis, estão naturalmente mais concentradas nas camadas epidérmicas dos mirtilos; devido à cavitação produzida pela utilização de ultrassom como pré-tratamento, houve uma ruptura adicional na superfície dessas frutas, aumentando a perda de pigmentos e de compostos bioativos.

Com relação à mudança de cor, Fava *et al.* (2011) analisaram as propriedades estruturais e a variação da cor da superfície de uvas (variedade *Isabella*) tratadas com ultrassom (frequência de 20 kHz, potência de 600 W, amplitude 80 % durante 5 minutos) na temperatura de 30 °C, a fim de otimizar processos de desinfecção. O resultado de variação global de cor ($\Delta E^* = 8,48$) indica que a utilização do ultrassom promoveu modificações visíveis ao olho humano, sendo considerada inaceitável.

Stojanovic & Silva (2007) também avaliaram a diferença global de cor (ΔE^*) após o processo de desidratação osmótica (realizado por 3 horas, na temperatura de 21 °C, utilizando uma solução osmótica de 55 °Brix) de mirtilos com e sem o uso de ultrassom contínuo com 100 W de potência. A diferença global de cor (ΔE^*) para os experimentos realizados com e sem ultrassom foram de 0,71 e 1,20, respectivamente, utilizando a escala CIELAB. Os resultados encontrados mostram que o uso do ultrassom não apresentou diferenças estatísticas ao nível de confiança de 95 %.

A Tabela 29 apresenta os dados da análise de atividade de água das amostras de physalis no início e após 10 horas de processamento, com e sem a aplicação de sonda de ultrassom como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica. Todas as medidas de atividade de água foram realizadas na temperatura de 25 °C. Pela análise desta tabela é possível verificar que o valor de p encontrado foi superior a 0,05 e, portanto, também para este parâmetro o uso de pré-tratamento com sonda de ultrassom não apresentou diferença

significativa ao nível de confiança de 95 %. Stojanovic & Silva (2007) também analisaram a atividade de água (a_w) no final do processo de desidratação osmótica de mirtilos e não encontraram diferenças estatísticas significativas com ou sem o uso do ultrassom contínuo.

Tabela 29. Atividade de água das amostras de physalis *in natura* (t = 0 h) e após a realização do processo de desidratação osmótica (na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix) durante 10 horas (t = 10 h) com e sem o uso de pré-tratamento de sonda de ultrassom.

	Physalis (t = 0 h)	Physalis (t = 10 h)	Teste-t
	média ± desvio padrão		p
Sem ultrassom	0,975 ± 0,003	0,960 ± 0,002	0,08
Com ultrassom	0,973 ± 0,001	0,965 ± 0,004	

Uma possível explicação para o fato de não ter havido diferenças estatisticamente significativas para todos os parâmetros estudados no presente trabalho entre o processamento de physalis com e sem a utilização de pré-tratamento de sonda de ultrassom, pode estar no fato de que a quantidade de amostra submetida a este pré-tratamento foi muito elevada (aproximadamente 800 g imersas em 2 litros de solução de solução osmótica), minimizando o efeito da sua aplicação sobre as amostras.

A proximidade de valores entre o diâmetro das amostras (de 1,5 a 2,5 cm) e o diâmetro da sonda de ultrassom (1,2 cm) também pode ter sido uma possível dificuldade, fazendo com que o efeito da sonda de ultrassom fosse minimizado. Além disso, a elevada viscosidade da solução osmótica (contendo 55 g de sacarose por 100 g de solução) pode ter contribuído para diminuir o efeito causado pela sonda de ultrassom nas physalis.

Fernandes, Gallão & Rodrigues (2008) utilizaram as amostras de melão imersas em água destilada para realizar o pré-tratamento com a sonda de ultrassom, ao invés de utilizar a própria solução osmótica (como realizado no presente trabalho), pois a solução osmótica apresenta viscosidade maior do que a da água. Segundos os autores, o efeito da sonda de ultrassom sobre amostras de alimentos parece ser mais pronunciado em soluções com viscosidade mais baixas do que mais elevadas.

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre a transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica de physalis (*Physalis peruviana* L.). O processo de desidratação osmótica foi avaliado com relação à temperatura (40-70 °C) e à concentração da solução de sacarose (40-70 g por 100 g de solução), assim como pela interação (TxC) dessas variáveis. Para isso, um planejamento experimental 2^2 com três repetições no ponto central (em duplicata) foi realizado. O estudo da cinética de desidratação para determinação dos conteúdos de umidade e de sacarose no equilíbrio foi realizado utilizando o modelo de Rastogi & Raghavarao. A utilização deste modelo apresentou um bom desempenho na previsão das condições de equilíbrio e na modelagem cinética da transferência de massa durante o tratamento osmótico de physalis, uma vez que, em todos os casos, o coeficiente de determinação foi superior a 0,8, indicando que o modelo conseguiu prever satisfatoriamente o ponto de equilíbrio.

Para a perda de água e para a incorporação do soluto, tanto a temperatura quanto à concentração da solução osmótica, assim como a interação dessas variáveis, foram estatisticamente significativas e aumentaram com o aumento da temperatura e com o aumento da concentração osmótica. No entanto, a análise estatística do conteúdo de carotenoides presentes no início e no final do processo osmótico mostrou que somente a temperatura teve significância estatística revelando que o aumento da perda de carotenoides acompanha o aumento da temperatura da solução osmótica, independente da concentração da solução osmótica de sacarose utilizada.

A solução analítica da Segunda Lei de Difusão de Fick, escrita em coordenadas esféricas, e utilizando os cinco primeiros termos da série, mostrou-se adequada para determinar a difusividade mássica efetiva, tanto da água quanto da sacarose na *physalis*. Os resultados obtidos para a difusividade mássica efetiva da água encontraram-se na faixa de $2,44 - 7,60 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, enquanto os resultados para a difusividade mássica efetiva da sacarose variaram de $2,13 - 3,20 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

O experimento realizado na temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e concentração da solução osmótica de $70 \text{ }^\circ\text{Brix}$ apresentou a melhor combinação de resultados em termos de eficiência de desidratação (aproximadamente 83 % da água presente na *physalis* foi removida após 10 horas de processo). No entanto, a maior perda de carotenoides também ocorreu nessa condição experimental, aproximadamente 50 % dos carotenoides totais foram perdidos, devido à exposição térmica, nesta condição experimental. Adicionalmente, verificou-se que a matriz estrutural do tecido da *physalis* sofreu alterações nessa condição experimental. Essas modificações do tecido foram comprovadas através da análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Nas condições experimentais testadas não houve modificações significativas na diferença global de cor (ΔE^*) devido ao processo de desidratação osmótica, uma vez que todos os valores ficaram próximos a 2,0.

Sendo assim, a fim de obter elevados teores de perda de água (WL), aproximadamente 83 %, durante o processo de desidratação osmótica de *physalis* recomenda-se a utilização das seguintes condições experimentais: temperatura da solução osmótica de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e concentração da solução de sacarose de $70 \text{ }^\circ\text{Brix}$. No entanto, caso os principais objetivos sejam a mínima incorporação de açúcares e a máxima retenção de carotenoides recomenda-se a utilização da condição intermediária de processamento, temperatura da solução osmótica de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e concentração da solução de sacarose de $55 \text{ }^\circ\text{Brix}$, ressaltando que a perda de água nessa condição experimental é menor, sendo de aproximadamente 50 %.

Os testes utilizando uma sonda de ultrassom (frequência de 20 KHz, amplitude de 80 % e tempo de 30 minutos) como pré-tratamento ao processo de desidratação osmótica (na temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$ e concentração da solução osmótica de $55 \text{ }^\circ\text{Brix}$) foram realizados e os resultados mostraram que a utilização da sonda de ultrassom não apresentou diferenças estatisticamente significativas para nenhum dos parâmetros estudados, nas condições avaliadas.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se avaliar o efeito do processo de desidratação osmótica sobre a microestrutura da matriz alimentícia em relação ao tempo de imersão da fruta na solução osmótica, além de avaliar a utilização de diferentes pré-tratamentos anteriores ao processo de desidratação a fim de aumentar a permeabilidade da casca cerosa da physalis.

Sugere-se avaliar e quantificar o encolhimento das amostras através da utilização de modelos matemáticos juntamente com a realização de experimentos e metodologias de análise que demonstrem a ocorrência deste fenômeno durante o processo de desidratação osmótica de frutas.

Sugere-se também realizar um estudo sobre as propriedades mecânicas e térmicas da physalis a partir de análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC). Além disso, sugere-se estudar a combinação do processo de desidratação osmótica com outros processos de secagem.

Finalmente, propõe-se a realização da análise sensorial dos produtos obtidos durante o processo de desidratação osmótica a fim de avaliar o efeito da incorporação da sacarose sobre o sabor e a aceitabilidade do produto final, assim como realizar o estudo de aplicação da physalis desidratada osmoticamente na fabricação de novos produtos para a indústria alimentícia.

Referências Bibliográficas

Aguilera, J. M. Temas em Tecnologia de Alimentos. México: Instituto Politécnico Nacional, p. 337, 1997.

Andrade, S. A. C.; Neto, B. B.; Nóbrega, A. C.; Azoubel, P. M.; Guerra, N. B. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of jenipapo (*Genipa americana* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 551 – 555, 2007.

Anuário Brasileiro da Fruticultura, Editora Gazeta Santa Cruz (p. 136), 2013.

AOAC (1990). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of analysis: 930.04. Moisture Content in Plants, 1, p. 40.

AOAC (1990). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of analysis: 932.12. Solids (Soluble) in Fruits and Fruit Products, Refractometer Method, p. 915.

AOAC (1990). Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of analysis: 978.18. Water Activity of Canned Vegetables, p. 987.

Azoubel, P. M. & Murr, F.E.X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 291-295, 2004.

Azuara, E.; Cortés, R.; Garcia, H. S., Beristain, C. I. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 27, p. 239-242, 1992.

Barat, J. M., Chiralt, A., & Fito, P. Equilibrium in cellular food osmotic solution systems as related to structure. **Journal of Food Science**, v. 63, p. 836-840, 1998.

Barat, J. M.; Fito, P. & Chiralt, A. Modeling of simultaneous mass transfer and structural changes in fruit tissues. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 77-85, 2001.

Botero, A. Aplicación de la Ingeniería de Matrices en el desarrollo da la uchuva mínimamente procesada fortificada con calcio y vitaminas C y E. Facultad de Química Farmacéutica, Magíster en Ciencias Farmacéuticas con Énfasis en Alimentos (p. 185). Medellín: Universidad de Antioquía, 2008.

Brighenti, A, F. Cultura da physalis no planalto catarinense e a influência de sistemas de condução na qualidade dos frutos. **Congresso Brasileiro de Fruticultura**, p. 20, Vitória. Anais... Vitória: Incaper, 2008.

Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Benedito, J.; Mulet, A. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p. 200-207, 2012.

Carvalho, C. R. L.; Mantovani, D. M. B.; Carvalho, P. R. N. Análises químicas de alimentos: manual técnico. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos (p. 121), 1990.

Castro, A. M.; Rodríguez, L. & Vargas, E. M. Dry Gooseberry (*Physalis peruviana* L.) with Pretreatment of Osmotic Dehydration. **Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica**, v. 15, n. 2, p. 226-231, 2008.

Cedeño, M. & Montenegro, D. Plan exportador, logístico y comercialización de uchuva al mercado de Estados Unidos para FRUTEXPO SCI Ltda. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2004.

Cenci, S. A. Processamento mínimo de frutas e hortaliças: tecnologia, qualidade e sistemas de embalagem. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, Embrapa Agroindústria de Alimentos, Rio de Janeiro: 1ª edição, p. 144, 2011.

Chandrasekaran, S.; Dayakar, A.; Veronica, J.; Sundar, S. & Maurya, R. An *in vitro* study of apoptotic like death in *Leishmania donovani* promastigotes by withanolides. **Parasitology International**, v. 62, p.253-261, 2013.

CIE (1978). Recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations, psychometric colour terms, CIE publication n°. 15 (E-1.3.1) 1971, Supplement 2. Viena: Bureau Central de la CIE.

Cortés, F. B.; López, V.; Rojano, B. A. Sorption Properties of Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **International Journal of Food Engineering**, v. 8 (1), Article 14, p. 1-16, 2012.

Crank, J. The mathematics of diffusion. 2. Ed. Oxford: Clarendon, 1975.

-
- Damodaran, S.; Parkin, K. L. & Fennema, O. R. Química de Alimentos de Fennema. 4^a edição, Artmed, Porto Alegre, p. 900, 2010.
- De Rosso, V. V. & Mercadante, A. Z. Identification and quantification of carotenoids, by HPLC-PDA-MS/MS, from Amazonian fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 5062-5072, 2007.
- El Sheikha, A. F.; Zaki, M. S.; Bakr, A. A.; El Habashy, M. M. & Montet, D. Biochemical and sensory quality of physalis (*Physalis pubescens* L.) juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 34 (3), p. 541-555, 2010.
- Erkaya, T.; Dagdemir, E. & Sengul, M. Influence of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) addition on the chemical and sensory characteristics and mineral concentrations of ice cream. **Food Research International**, v. 45, p.331-335, 2012.
- Esclapez, M. D., García-Pérez, J. V., Mulet, A. & Cárcel, J. A. Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Products. **Food Engineering Reviews**, v. 3, p. 108-120, 2011.
- Fang, S. T.; Liu, J. K. & Li, B. Ten new Withanolides from *Physalis peruviana*. **Steroids**, v. 77, p. 36-44, 2012.
- Fava, J., Hodara, K., Nieto, A., Guerrero, S., Alzamora, S. M. & Castro, M. A. Structure (micro, ultra, nano), color and mechanical properties of *Vitis labrusca* L. (grape berry) fruits treated by hydrogen peroxide, UV-C irradiation and ultrasound. **Food Research International**, v. 44, p. 2938-2948, 2011.
- Fellows, P. J. Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Prática. 2^a edição, Artmed. Porto Alegre, p. 602, 2006.
- Fernandes, F. A. N., Gallão, M. I. & Rodrigues, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. **LWT – Food Science and Technology**, v. 41, p. 604-610, 2008.
- Fernandes, F. A. N.; Rodrigues, S.; Gaspareto, O. C. P.; Oliveira, E. L. Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. **Food Research International**, v. 39 (4), p. 492-498, 2006.
- Fischer, G. & Almanza, P. J. Nuevas Tecnologías en el Cultivo de la Uchuva *Physalis Peruviana* L. **Revista Agrodesarrollo**, v. 4, n. 1-2, p. 294, 1993.
- Francis, F. J. & Clydesdale, F. M. Food Colorimetry: Theory and applications, 1975.

-
- Galmarini, M. V.; Baeza, R.; Sanchez, V.; Zamora, M. C. & Chirife, J. Comparison of the viscosity of trehalose and sucrose solutions at various temperatures: Effect of guar gum addition. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 186 – 190, 2011.
- Galvis, J. A.; Fischer, G. & Gordillo, O. P. Cosecha y poscosecha de la Uchuva. Capítulo de libro. En: Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la Uchuva *Physalis peruviana* L. Editorial Universidad Nacional de Colombia, (p. 165-190), 2005.
- Godoy, J. C. M. Determinación de los parámetros para la simulación matemática del proceso de deshidratación de la uchuva (*Physalis Peruviana* L.). Disertación de Maestría. Universidad Nacional De Colombia. Departamento De Ingeniería Civil Y Agrícola. Facultad De Ingeniería. Bogotá, Colombia, 2011.
- Gomes, A. T.; Cereda, M. P. & Vilpoux, O. Desidratação Osmótica: uma tecnologia de baixo custo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 3, n. 3, p. 212-226, 2007.
- Heredia, A.; Barrera, C. & Andrés, A. Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 111–118, 2007.
- Herman-Lara, E.; Martínez-Sánchez, C. E.; Pacheco-Ângulo, H.; Carmona-García, R.; Ruiz-Espinosa, R. & Ruiz-López, I. I. Mass transfer modeling of equilibrium and dynamic periods during osmotic dehydration of radish in NaCl solutions. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, p. 216-224, 2013.
- Hsu, C. C.; Wu, Y. C.; Farh, L.; Du, Y. C.; Tseng, W. K.; Wu, F., R. C. Physalin B from *Physalis angulata* triggers the NOXA-related apoptosis pathway of human melanoma A375 cells. **Food and Chemical Toxicology**, v. 50, p. 619-624, 2012.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011), acesso em 22.04.2013.
- Ibraf, Instituto Brasileiro de Frutas (2012), acesso em 29.05.2013.
- ICONTEC, Instituto Colombiano De Normas Técnicas Y Certificación. Norma Técnica Colombiana Uchuva NTC 4580. Bogotá, p. 5, 1999.
- Incropera, F. P.; De Witt, D. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6 edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

-
- Jena, S. & Das, H. Modelling for moisture variation during osmo-concentration in apple and pineapple. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 425-432, 2005.
- Khan, M. A. M.; Ahrne, L.; Oliveira, J. C. & Oliveira, F. A. R. Prediction of water and soluble solids concentration during osmotic dehydration of mango. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86, p. 07-13, 2008.
- Khoyi, M. R. & Hesari, J. Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 1355-1360, 2007.
- Lan, Y. H.; Chang, F. R.; Pan, M. J., Wu, C. C.; Wu, S. J.; Chen, S. L.; Wang, S. S.; Wu, M. J.; Wu, Y. C. New cytotoxic withanolides from *Physalis peruviana*. **Food Chemistry**, v. 116, p. 462-469, 2009.
- Lee, H. S. & Coates, G. A. Effect of thermal pasteurization on Valencia orange juice color and pigments. **Lebensmittel-Wissenschaft und –Technologie**, v. 36, p. 153-156, 2003.
- Lee, H. S. & Coates, G. A. Thermal pasteurization effects on color of red grapefruit juices. **Journal of Food Science**, v. 64, p. 663–666, 1999.
- Li, H., & Ramaswamy, H. S. Osmotic dehydration: dynamics of equilibrium and pseudo-equilibrium kinetics. **International Journal of Food Properties**, v. 13, p. 234-250, 2010.
- Li, X.; Zhang, C.; Li, W.; Wu, D.; Liu, J.; Tang, L.; Xin, Y. In vivo effects on the intestinal microflora of *Physalis alkekengi* var. *francheti* extracts. **Fitoterapia**, v. 87, p. 43-48, 2013.
- Licodiedoff, S.; Ribani, R. H.; Camlofski, A. M. O. & Lenzi, M. K. Use of Image Analysis for Monitoring the Dilution of *Physalis peruviana* Pulp. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 56, n. 3, p. 467-474, 2013.
- Lima, V. L. A. G.; Mélo, E. A.; Guerra, N. B. Correlação entre o teor de antocianinas e caracterização cromática de polpas de diferentes genótipos de aceroleira. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 10, n. 1, p. 51-55, 2007.
- Llaverias, G.; Escolà-Gil, J. C.; Lerma, E.; Julve, J. Pons, C.; Cabré, A.; Cofán, M.; Ros, E.; Sánchez-Quesada, J. L.; Blanco-Vaca, F. Phytosterols inhibit the tumor growth and lipoprotein oxidizability induced by a high-fat diet in mice with inherited breast cancer. **Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 24, p. 39-48, 2013.
- Lombard, G. E; Oliveira, J. C.; Fito, P. & Andrés, A. Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. **Journal of Food Engineering**, v. 85, p. 277-284, 2008.

-
- Marín, Z. Viabilidad de desarrollo de uchuva (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesada enriquecida con microorganismos probióticos a partir de la Ingeniería de Matrices. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos (pp. 152). Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- Mayor, L.; Moreira, R. & Sereno, A. M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 103, p. 29-37, 2011.
- Mayorga, H.; Knapp, H.; Winterhalter, P. & Duque, C. Glycosidically bound flavor compounds of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, p. 1904-1908, 2001.
- Mazorra, M. Aspectos anatómicos de la formación y crecimiento del fruto de uchuva *Physalis peruviana* (*Solanaceae*). **Acta Biológica Colombiana**, v. 11 (1), p. 69-81, 2006.
- Medina-Vivanco, M.; Sobral, P. J. A. & Hubinger, M. D. Osmotic dehydration of tilapia fillets in limited volumen of ternary solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 86, p. 1-7, 2002.
- Melgosa, M.; Pérez, M. M.; Yebra, A.; Huertas, R. & Hita, E. Some reflections and recent international recommendations on color-difference evaluation. **Óptica Pura Y Aplicada**, v. 34, p. 1-10, 2001.
- Mercali, G. D. Estudo da Transferência de Massa na Desidratação Osmótica de Banana (*Musa sapientum, shum.*). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Mestrado em Engenharia Química (p. 163). Porto Alegre, 2009.
- Mercali, G. D.; Marczak, L. D. F.; Tessaro, I. C. & Noreña, C. P. Z. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum, shum.*). **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 82-91, 2011.
- Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural Colombiano, 2009.
- MINOLTA. Precise color communication: Color control from feeling to instrumentation. Japão: Minolta Corporation, p. 49, 1994.
- Moraga, M. J., Moraga, G., Martínez-Navarrete, N. Effect of the re-use of the osmotic solution on the stability of osmodehydro-refrigerated grapefruit. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, p. 35-41, 2011.

-
- Mujumdar, A. S. Handbook of Industrial Drying. 2^a edição, v. 1, p.742, 1995.
- Muniz, J.; Kretzschmar, A. A.; Rufato, L.; Pelizza, T. R.; Marchi, T.; Duarte, A. E.; Lima, A. P. F. & Garanhani, F. Sistemas de Condução para o Cultivo de Physalis no Planalto Catarinense. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 830-838, 2011.
- Nabetani, H.; Nakajima, M.; Watanabe, A.; Nakao, S. I. & Kimura, S. Prediction of the flux for the reverse osmosis of solution containing sucrose and glucose. **Journal of Chemical Engineering Japan**, v. 25, p. 575–580, 1992.
- NCR, National Research Council, 1989.
- Nowacka, M.; Tylewicz, U.; Laghi, L.; Dalla Rosa, M. & Witrowa-Rajchert, D. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration. **Food Chemistry**, v. 144, p. 18–25, 2014.
- Nsonzi, F. & Ramaswamy, H. S. Osmotic dehydration of blueberries. **Drying Technology**, v. 16, p. 725 – 741, 1998.
- Nuñez-Mancilla, Y.; Pérez-Won, M.; Uribe, E.; Vega-Gálvez, A. & Di Scala, K. Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*). **LWT – Food Science and Technology**, v. 52, p. 151-156, 2013.
- O'Donnell, C. P.; Adekunle, A. O.; Tiwari, B. K.; Cullen, P. J.; Scannel, A. G. M. Effects of sonication on colour, ascorbic acid and yeast inactivation in tomato juice. **Food Chemistry**, v. 122, p. 500-507, 2010.
- Ortuño, C.; Pérez-Munuera, I.; Puig, A.; Riera, E. & García-Pérez, J.V. Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. **Physics Procedia**, v. 3, p. 153-159, 2010.
- Park, K. J.; Bin, A. & Brod, F. P. R. Drying of pear D'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 97-103, 2002.
- Park, K. J.; Bin, A.; Brod, F. P. R. & Park, T. H. K. B. Osmotic dehydration kinetics of pear D'Anjou (*Pyrus communis* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 293-298, 2002.
- Peleg, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1219, 1988.

-
- Pérez-Castorena, A. L.; Luna, M.; Martínez, M. & Maldonado, E. New sucrose esters from the fruits of *Physalis solanaceus*. **Carbohydrate Research**, v. 352, p. 211-214, 2012.
- Pinheiro, A. C. M.; Vilas Boas, E. V. B. Influência do CaCl₂ sobre a qualidade pós-colheita do abacaxi cv. Perola. **Ciência de Alimentos**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 32-36, 2005.
- Potter, U. J. & Love, G. Scanning Electron. **Microscopy**, 1999.
- Puente, L. A.; Pinto-Muñoz, C. A.; Castro, E. S. & Cortés, M. *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. **Food Research International**, v. 44, p. 1733-1740, 2011.
- Rahman, M. S. Dried food properties: challenges ahead. **Drying Technology**, v. 23, p. 695-715, 2005.
- Rahman, M. S. Toward prediction of porosity in food during drying: a brief review. **Drying Technology**, v. 19, p. 1-13, 2001.
- Ramadan, M. F. & Moersel, J. T. Impact of enzymatic treatment on chemical composition, physicochemical properties and radical scavenging activity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 87, p. 452-460, 2007.
- Ramadan, M. F. & Moersel, J. T. Oil Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 969-974, 2003.
- Ramadan, M. F. & Moersel, J-T. Oil extractability from enzymatically treated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) pomace: range of operational variables. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 435-444, 2009.
- Ramadan, M. F. Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of Cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. **Food Research International**, v. 44, p. 1830-1836, 2011.
- Ramadan, M. F., & Moersel, J. T. Goldenberry: A novel fruit source of fat soluble bioactives. **Informative Novel Crop Production**, v. 15 (2), p. 130–131, 2004.
- Rastogi, N. K. & Raghavarao, K. S. M. S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. **Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie**, v. 37, p. 43-47, 2004.

-
- Rastogi, N. K. & Raghavarao, K. S. M. S. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v. 34, p. 429-440, 1997.
- Rastogi, N. K., Angersbach, A. & Knorr, D. Evaluation of Mass Transfer Mechanisms During Osmotic Treatment of Plant Materials. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 6, p. 1016-1019, 2000.
- Rastogi, N. K.; Raghavarao, K. S. M. S.; Niranjan, K. & Knorr, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science and Technology**, v. 13(2), p. 48-59, 2002.
- Restrepo, A., Cortés, M. & Márquez, C. Cape Gooseberry (*Physalis peruviana* L.) minimally processed fortified with Vitamin E. **Vitae-Revista De La Facultad De Química Farmacéutica**, v. 16, n. 1, p. 19-30, 2009.
- Ribeiro, E. P. & Seravalli, E. A. G. Química de Alimentos. Instituto Mauá de Tecnologia. Editora Edgard Blücher Ltda, 1ª edição, São Paulo, p. 155-157, 2004.
- Rodrigues, E.; Rockenbach, I. I.; Cataneo, C.; Gonzaga, L. V.; Chaves, E. S., Fett, R. Minerals and essential fatty acids of the exotic fruit *Physalis peruviana* L. **Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas**, v. 29, p. 642-645, 2009.
- Rodrigues, S. & Fernandes, F. A. N. Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 678-687, 2007.
- Rodríguez, M. M.; Arballo, J. R.; & Campañone, L. A.; Cocconi, M. B.; Pagano, A. M. & Mascheroni, R. H. Osmotic Dehydration of Nectarines: Influence of the Operating Conditions and Determination of the Effective Diffusion Coefficients. **Food Bioprocess Technology**, v. 6, p. 2708-2720, 2013.
- Rodriguez-Amaya, D. B. Carotenoids and food preparation: the retention of provitamin A carotenoids in prepared, processed, and stored foods. p. 93, 1997.
- Rodriguez-Amaya, D. B. Quantitative analysis, in vitro assessment of bioavailability and antioxidant activity of food carotenoids - A review. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 23, p. 726 - 740, 2010.
- Rodriguez-Amaya, D. B. Some considerations in generating carotenoid data for food composition tables. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 13, p. 641-647, 2000.

-
- Rodriguez-Amaya, D. B.; Kimura, M. & Amaya-Farfan, J. Fontes Brasileiras de Carotenoides. Brasília, (p. 101), 2008.
- Rop, O.; Mlcek, J.; Jurikova, T. & Valsikova, M. Bioactive content and antioxidant capacity of Cape gooseberry fruit. **Central European Journal of Biology**, v. 7, p. 672-679, 2012.
- Sacchetti, G.; Gianotti, A.; Dalla Rosa, M. Sucrose-salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 163-173, 2001.
- Sadilova, E.; Carle, R. & Stintzing, F. C. Thermal degradation of anthocyanins and its impact on color and *in vitro* antioxidant capacity. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 51, p. 1461-1471, 2007.
- Sanjinez-Argandoña, E. J.; Cunha, R. L., Menegalli, F. C. & Hubinger, M. D. Evaluation of total catotenoids and ascorbic acid in osmotic pretreated guavas during convective drying, Italian **Journal of Food Science**, v. 17 (3), p. 305-315, 2005.
- Santos, A. M. Pequenas Frutas: Novas Alternativas de Diversificação com Fruticultura em Pequenas propriedades. VI Enfrute, Encontro Nacional Sobre Fruticultura de Clima Temperado. Fraiburgo, SC. Anais... p. 7-14, 2003.
- Schmidt, F. C.; Carciofi, B. A. M.; Laurindo, J. B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 553-559, 2009.
- Schwartzberg, H. G & Chao, R. Y. Solute diffusivities in leaching processes. **Food Technology**, v. 36, p. 73-86, 1982.
- Sereno, A. M.; Hubinger, M. D., Comesaña, J. F. & Correa, A. Prediction of water activity of osmotic solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 103-114, 2001.
- Sereno, A. M; Moreira, R. & Martínez, E. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple single and combined aqueous solution of sugar and salts. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 43-49, 2001.
- Shi, J. X., Le Maguer, M., Wang, S. L. & Liptay, A. Application of osmotic treatment in tomato processing-effect of skin treatments on mass transfer in osmotic dehydration of tomatoes. **Food Research International**, v. 30, p. 669-674, 1997.

-
- Silva, M. A. C., Silva, Z. E., Mariani, V. C. & Darce, S. Mass transfer during the osmotic dehydration of West Indian cherry. **LWT - Food Science and Technology**, v. 45, p. 246-252, 2012.
- Simal, S., Benedito, J., Sánchez, E. S. & Rossello, C. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 36, p. 323-336, 1998.
- Singh, B., Panesar, P. S., Nanda, V. & Kennedy, J. F. Optimisation of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. **Food Chemistry**, v. 123, p. 590-600, 2010.
- Singh, B.; Kumar, A. & Gupta, A. K. Study of mass transfer kinetics and effective diffusivity during osmotic dehydration of carrot cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 471-480, 2007.
- Smith, P. G. Introduction to Food Process Engineering. Nova York: Kluwer Academic, 2003.
- Soares, L. V. Curso Básico de Instrumentação para Analistas de Alimentos e Fármacos. Editora Manole, Barueri, São Paulo, p. 28-31, 2006.
- Soares, M. B.; Brustolim, D.; Santos L. A.; Bellintani, M. C.; Paiva, F. P.; Ribeiro, Y. M.; Tomassini, T. C. & Ribeiro R. S. Physalins B, F and G, seco-steroids purified from *Physalis angulata* L., inhibit lymphocyte function and allogeneic transplant rejection. **International Immunopharmacol**, v. 6, p. 408-414, 2006.
- Soria, A. C. & Villamiel, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, p. 323-331, 2010.
- Stojanovic, J. & Silva, J. L. Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of *Rabbiteye blueberries*. **Food Chemistry**, v. 101, p. 898-906, 2007.
- Sutar, P. P.; & Gupta, D. K. Mathematical modeling of mass transfer in osmotic dehydration of onion slices. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p.90-97, 2007.
- TACO, Tabela brasileira de composição de alimentos. T113 Versão II. 2 edição. Campinas: NEPA – UNICAMP, 2006.

-
- Tapia, M. E. & Fries, A. M. Guía de campo de los cultivos andinos. **FAO & ANPE**. Lima, 2007.
- Tarleton, E. S. & Wakeman, R. J. Ultrasonically assisted separation process. **Ultrasounds in Food Processing**, p. 193-218, 1998.
- Telis, V. R. N.; Murari, R. C. B. D. L. & Yamashita, F. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 253-259, 2004.
- Togrul, I. T. & Ispir, A. Equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of apricot. **Food and Bioproducts Processing**, v. 86 (4), p. 254-267, 2008.
- Tonon, R. V., Baroni, A. F. & Hubinger, M. D. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 509-517, 2007.
- Torreggiani, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetables. **Process and Food International**, v. 26, p. 59-68, 1993.
- Toupin, C. J. & Le Maguer, M. Osmotically-induced mass transfer in plant storage tissues: a mathematical model. Part II. **Journal of Food Engineering**, v. 10, n. 1, p. 97-121, 1989.
- Tsamoa, C. V. P.; Bilamea, A. F.; Ndjouenkeua, R. & Nonob, Y. J. Study of material transfer during osmotic dehydration of onion slices (*Allium cepa*) and tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruits. **LWT- Food Science and Technology**, v. 38, p. 495-500, 2005.
- Ulloa, J. A.; Guatemala, G. M.; Arriola, E; Escalona, H. B; Díaz, L. Estimation of the diffusivities of sodium chloride, potassium sorbate and sodium bisulphite in mango slices processed by hurdle technology. **Journal of Food Engineering**, v. 91, p. 211-216, 2009.
- Valdenegro, M.; Almonacid, S.; Henríquez, C.; Lutz, M.; Fuentes, L. & Simpson, R. The Effects of Drying Processes on Organoleptic Characteristics and the Health Quality of Food Ingredients Obtained from Goldenberry Fruits (*Physalis peruviana*). **Open Access Scientific Reports**, v. 2, p. 1-7, 2013.
- Valente, P. P. S. S. Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill), variedade Pérola. Campinas: Unicamp, 2007. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

Varzakas, T. H.; Leach, G. C.; Israilides, C. J.; Arapoglou, D. Theoretical and experimental approaches towards the determination of solute effective diffusivities in foods. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 37, p. 29-41, 2005.

Vasco, C., Ruales, J. & Eldin, A. K. Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. **Food Chemistry**, v. 111, p. 816-823, 2008.

Vásquez-Parra, J. E., Ochoa-Martínez, C. I. & Bustos-Parra, M. Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of Cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 648-654, 2013.

Vega-Gálvez, A.; Puente-Díaz, L.; Lemus-Mondaca, R.; Miranda, M. & Torres, M. J. Mathematical Modeling of Thin-Layer Drying Kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis Peruviana* L.). **Journal of Food Processing and Preservation**, ISSN 1745-4549, p. 1-9, 2012.

Wu, S. J.; Ng, L. T.; Huang, Y. M.; Lin, D. L.; Wang, S. S.; Huang, S. N. & Lin, C. C. Antioxidant activities of *Physalis peruviana*. **Biological & Pharmaceutical Bulletin**, v. 28, 963-966, 2005.

Wu, S. J.; Tsai, J. Y.; Chang, S. P.; Lin, D. L.; Wang, S. S. & Huang, S. N. Supercritical carbon dioxide extract exhibits enhanced antioxidant and anti-inflammatory activities of *Physalis peruviana*. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 108, p. 407-413, 2006.

Zavala, D., Maurício, Q., Pelayo, A., Posso, M., Rojas, J. & Wolach, V. Citotoxic effect of *Physalis peruviana* (capuli) in colon cancer and chronic myeloid leukemia. **Anales de la Facultad de Medicina**, v. 67 (4), p. 283-289, 2006.

Zúñiga, R. N. & Pedreschi, F. Study of the Pseudo-equilibrium During Osmotic Dehydration of Apples and Its Effect on the Estimation of Water and Sucrose Effective Diffusivity Coefficients. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5 (7), p. 2717-2727, 2012.

Apêndice A

Dados complementares - Teor de Umidade

A seguir são apresentados os resultados experimentais do teor de umidade em base seca (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis tratadas osmoticamente nos diferentes tempos de imersão para cada tratamento do planejamento experimental. As análises do conteúdo de umidade foram realizadas em triplicata para cada tempo de imersão.

Tabela A.1. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 1 e 10, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 1		Experimento 10	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,491	± 0,060	4,499	± 0,051
1	4,391	± 0,095	4,433	± 0,092
2	4,372	± 0,069	4,431	± 0,108
3	4,342	± 0,105	4,481	± 0,097
4	4,613	± 0,099	4,392	± 0,125
6	4,256	± 0,120	4,552	± 0,090
8	4,520	± 0,058	4,303	± 0,078
10	4,035	± 0,055	4,180	± 0,040

Tabela A.2. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 3 e 12, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 3		Experimento 12	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,314	± 0,089	4,889	± 0,161
1	4,409	± 0,074	4,779	± 0,143
2	4,231	± 0,114	4,845	± 0,095
3	4,407	± 0,100	4,589	± 0,104
4	4,383	± 0,052	4,510	± 0,082
6	4,213	± 0,063	4,485	± 0,092
8	4,206	± 0,107	4,482	± 0,050
10	4,184	± 0,074	4,730	± 0,089

Tabela A.3. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 6, 7 e 8, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 6		Experimento 7		Experimento 8	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,603	± 0,099	4,530	± 0,317	4,160	± 0,052
1	4,431	± 0,099	4,192	± 0,099	4,181	± 0,051
2	4,316	± 0,086	3,789	± 0,085	3,959	± 0,090
3	3,958	± 0,098	3,349	± 0,088	3,311	± 0,072
4	3,695	± 0,063	3,007	± 0,098	3,098	± 0,034
6	3,101	± 0,073	2,648	± 0,094	2,979	± 0,112
8	2,834	± 0,101	2,355	± 0,078	2,300	± 0,076
10	2,717	± 0,085	2,172	± 0,050	2,249	± 0,077

Tabela A.4. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 11, 14 e 19, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 11		Experimento 14		Experimento 19	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,769	± 0,101	4,708	± 0,033	4,985	± 0,037
1	4,526	± 0,118	4,396	± 0,079	4,821	± 0,085
2	4,182	± 0,092	4,111	± 0,087	4,499	± 0,109
3	3,944	± 0,087	3,739	± 0,087	4,108	± 0,081
4	3,631	± 0,075	3,576	± 0,081	3,581	± 0,079
6	3,095	± 0,110	3,149	± 0,086	3,338	± 0,070
8	2,666	± 0,076	2,588	± 0,071	2,732	± 0,080
10	2,237	± 0,080	2,177	± 0,066	2,356	± 0,046

Tabela A.5. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 4 e 13, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 4		Experimento 13	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,393	± 0,075	4,859	± 0,072
1	4,069	± 0,092	4,323	± 0,084
2	3,447	± 0,091	4,007	± 0,082
3	3,246	± 0,078	3,784	± 0,041
4	2,999	± 0,087	3,666	± 0,089
6	2,685	± 0,100	3,160	± 0,075
8	2,490	± 0,115	2,785	± 0,044
10	2,143	± 0,085	2,614	± 0,051

Tabela A.6. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 2, 9 e 16, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 2		Experimento 9		Experimento 16	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,228	± 0,082	4,798	± 0,041	4,615	± 0,060
1	3,908	± 0,089	3,697	± 0,118	4,025	± 0,046
2	2,858	± 0,869	2,972	± 0,100	3,364	± 0,113
3	2,574	± 0,076	2,202	± 0,092	2,927	± 0,107
4	2,015	± 0,054	1,718	± 0,109	2,194	± 0,037
6	1,313	± 0,060	1,308	± 0,007	1,375	± 0,084
8	0,873	± 0,033	0,895	± 0,030	0,990	± 0,023
10	0,762	± 0,044	0,733	± 0,000	0,823	± 0,016

Tabela A.7. Teor de umidade (g de água por g de sólidos secos) das amostras de physalis dos experimentos 15, 17 e 18, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix, após o pré-tratamento de sonda de ultrassom, em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 15		Experimento 17		Experimento 18	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	4,938	± 0,069	4,851	± 0,065	4,540	± 0,072
1	4,712	± 0,048	4,513	± 0,052	4,371	± 0,085
2	4,205	± 0,096	4,163	± 0,073	4,156	± 0,054
3	4,208	± 0,078	4,105	± 0,056	4,121	± 0,079
4	4,117	± 0,076	4,007	± 0,076	3,891	± 0,098
6	3,423	± 0,097	3,520	± 0,092	3,231	± 0,086
8	3,238	± 0,118	2,889	± 0,046	2,943	± 0,065
10	2,704	± 0,029	2,565	± 0,055	2,457	± 0,018

Apêndice B

Dados complementares - Teor de Sólidos Solúveis

A seguir são apresentados os resultados experimentais do conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis tratadas osmoticamente nos diferentes tempos de imersão para cada tratamento do planejamento experimental. Essas análises foram realizadas em triplicata utilizando um refratômetro de bancada.

Tabela B.1. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 1 e 10, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 1		Experimento 10	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	11,3	± 0,3	10,3	± 0,3
1	11,3	± 0,6	11,2	± 0,3
2	11,3	± 0,3	10,8	± 0,3
3	11,8	± 0,3	11,3	± 0,3
4	11,6	± 0,4	11,3	± 0,3
6	11,7	± 0,3	11,5	± 0,5
8	12,4	± 0,5	11,2	± 0,3
10	12,5	± 0,5	11,3	± 0,3

Tabela B.2. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 3 e 12, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 3		Experimento 12	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	12,0	± 0,3	11,0	± 0,1
1	11,5	± 0,5	10,7	± 0,3
2	11,8	± 0,6	11,0	± 0,5
3	12,7	± 0,6	11,5	± 0,5
4	12,7	± 0,6	11,3	± 0,3
6	12,2	± 0,6	10,5	± 0,5
8	12,5	± 0,5	10,7	± 0,3
10	12,5	± 0,5	11,5	± 0,5

Tabela B.3. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 6, 7 e 8, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 6		Experimento 7		Experimento 8	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	12,3	± 0,3	12,8	± 0,3	12,2	± 0,2
1	12,5	± 0,5	13,0	± 0,5	12,3	± 0,3
2	13,3	± 0,3	14,7	± 0,3	13,2	± 0,3
3	14,3	± 0,3	15,8	± 0,3	13,3	± 0,3
4	15,2	± 0,3	17,2	± 0,6	14,9	± 0,2
6	17,8	± 0,3	19,7	± 0,3	18,3	± 0,3
8	19,2	± 0,6	23,3	± 0,3	20,5	± 0,5
10	23,5	± 0,5	26,3	± 0,3	24,5	± 0,5

Tabela B.4. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 11, 14 e 19 realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 11		Experimento 14		Experimento 19	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	11,5	± 0,1	12,5	± 0,5	12,7	± 0,3
1	11,6	± 0,1	13,3	± 0,6	14,2	± 0,3
2	13,3	± 0,3	15,2	± 0,6	15,4	± 0,4
3	14,2	± 0,3	17,7	± 0,3	16,3	± 0,3
4	16,0	± 0,1	18,7	± 0,8	16,5	± 0,5
6	18,3	± 0,3	19,7	± 0,3	19,4	± 0,1
8	22,3	± 0,3	23,2	± 0,3	23,3	± 0,3
10	25,2	± 0,3	27,3	± 1,0	26,5	± 0,5

Tabela B.5. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 4 e 13, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 4		Experimento 13	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	12,3	± 0,3	12,7	± 0,3
1	14,2	± 0,3	12,8	± 0,3
2	15,0	± 0,2	15,7	± 0,3
3	16,0	± 0,2	16,2	± 0,3
4	16,8	± 0,8	17,2	± 0,3
6	19,2	± 1,0	18,4	± 0,1
8	22,7	± 0,3	22,0	± 0,5
10	24,8	± 0,8	23,2	± 0,8

Tabela B.6. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 2, 9 e 16, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 2		Experimento 9		Experimento 16	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	9,2	± 0,3	12,2	± 0,3	13,2	± 0,3
1	11,2	± 0,3	15,4	± 0,1	14,5	± 0,5
2	13,2	± 0,3	19,6	± 0,1	17,8	± 0,3
3	18,9	± 0,5	25,7	± 0,3	21,2	± 0,3
4	24,9	± 0,4	29,2	± 0,3	25,0	± 0,3
6	35,0	± 0,5	36,0	± 0,2	37,5	± 0,3
8	45,5	± 1,0	45,0	± 0,5	45,0	± 0,6
10	52,0	± 1,2	50,0	± 1,5	51,0	± 1,5

Tabela B.7. Conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) das amostras de physalis dos experimentos 15, 17 e 18, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix, após o pré-tratamento de sonda de ultrassom, em diferentes tempos de imersão.

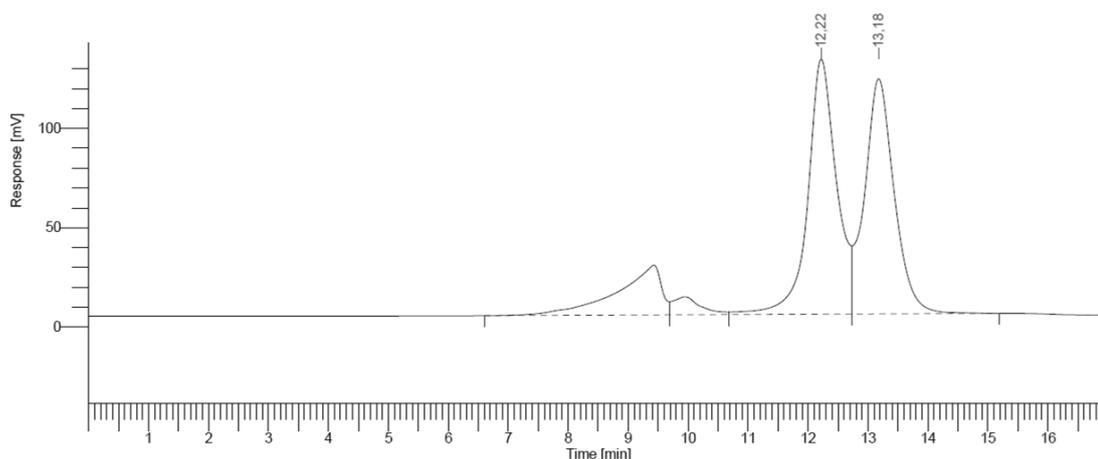
Tempo (h)	Experimento 15		Experimento 17		Experimento 18	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	14,8	± 0,3	13,7	± 0,6	12,1	± 0,2
1	14,7	± 0,3	14,7	± 0,3	14,2	± 0,3
2	16,4	± 0,1	15,3	± 0,6	15,8	± 0,3
3	16,2	± 0,6	15,3	± 0,6	14,9	± 0,4
4	16,4	± 0,4	16,1	± 0,5	16,1	± 0,2
6	18,7	± 0,3	19,5	± 0,5	18,7	± 0,3
8	20,0	± 0,5	22,3	± 0,6	21,3	± 0,3
10	22,8	± 0,3	23,7	± 0,3	26,0	± 0,5

Apêndice C

Dados complementares – Cromatograma da análise de açúcar em HPLC-IR

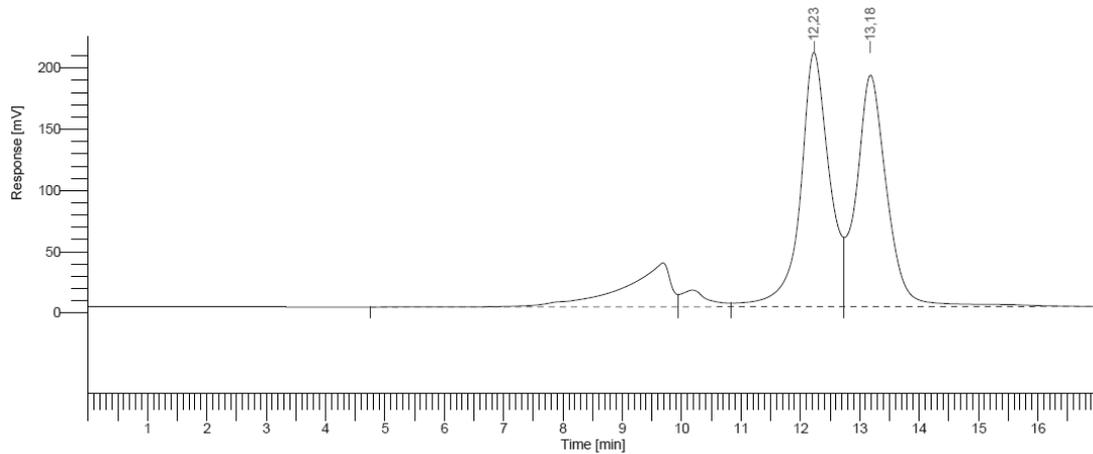
A seguir são apresentados os cromatogramas exemplificando o resultado da análise de açúcares obtido pelo HPLC-IR para a amostra de physalis *in natura* e para a amostra de physalis após oito (8) horas de processo de desidratação osmótica, na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix, onde é possível identificar o pico da glicose (tempo de retenção de 12,3 minutos) e o pico da frutose (tempo de retenção de 13,3 minutos), assim como, uma tabela com as respectivas áreas desses picos.

Figura C.1. Cromatograma da análise de açúcares para a amostra de physalis *in natura* obtido em HPLC-IR para o experimento número 8 (temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix).



Pico	Tempo (minutos)	Área
1	12,218	4269661,95
2	13,176	4063275,86
Total		8332937,81

Figura C.2. Cromatograma da análise de açúcares para a amostra de physalis após oito (8) horas de desidratação osmótica obtido em HPLC-IR para o experimento número 8 (temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix).



Pico	Tempo (minutos)	Área
1	12,227	7021560,00
2	13,182	6760517,87
Total		13782077,87

Apêndice D

Dados complementares - Teor de Açúcar

A seguir são apresentados os resultados experimentais do teor de açúcar (g de glicose por g amostra) das amostras de physalis tratadas osmoticamente nos diferentes tempos de imersão para cada tratamento do planejamento experimental. As análises do conteúdo de açúcar foram realizadas em triplicata para cada tempo de imersão usando Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC).

Tabela D.1. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 1 e 10, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 1		Experimento 10	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,0949	± 0,0013	0,0948	± 0,0002
1	0,0939	± 0,0008	0,0989	± 0,0031
2	0,0961	± 0,0019	0,0955	± 0,0034
3	0,0961	± 0,0005	0,1031	± 0,0010
4	0,0950	± 0,0008	0,0980	± 0,0011
6	0,1030	± 0,0004	0,0978	± 0,0016
8	0,1024	± 0,0009	0,1022	± 0,0010
10	0,0990	± 0,0012	0,0974	± 0,0011

Tabela D.2. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 3 e 12, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 3		Experimento 12	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,1029	± 0,0001	0,0953	± 0,0021
1	0,0961	± 0,0002	0,0911	± 0,0008
2	0,0937	± 0,0006	0,1010	± 0,0005
3	0,0979	± 0,0002	0,0989	± 0,0022
4	0,0997	± 0,0007	0,1040	± 0,0003
6	0,1014	± 0,0005	0,0976	± 0,0016
8	0,1022	± 0,0001	0,0941	± 0,0004
10	0,1023	± 0,0005	0,1007	± 0,0003

Tabela D.3. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 6, 7 e 8, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 6		Experimento 7		Experimento 8	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,1038	± 0,0038	0,0834	± 0,0003	0,1032	± 0,0075
1	0,1279	± 0,0087	0,0934	± 0,0005	0,0990	± 0,0065
2	0,1180	± 0,0027	0,0888	± 0,0006	0,1184	± 0,0020
3	0,1162	± 0,0008	0,1122	± 0,0011	0,1149	± 0,0021
4	0,1239	± 0,0008	0,1128	± 0,0005	0,1326	± 0,0010
6	0,1465	± 0,0007	0,1225	± 0,0014	0,1549	± 0,0049
8	0,1609	± 0,0010	0,1484	± 0,0016	0,1874	± 0,0012
10	0,1878	± 0,0009	0,1636	± 0,0009	0,2051	± 0,0034

Tabela D.4. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 11 e 14, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 11		Experimento 14	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,0968	± 0,0016	0,0970	± 0,0005
1	0,1090	± 0,0016	0,0965	± 0,0313
2	0,1250	± 0,0001	0,1226	± 0,0005
3	0,1318	± 0,0004	0,1286	± 0,0009
4	0,1422	± 0,0001	0,1441	± 0,0007
6	0,1574	± 0,0119	0,1493	± 0,0031
8	0,1739	± 0,0200	0,1887	± 0,0026
10	0,2177	± 0,0033	0,2167	± 0,0058

Tabela D.5. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 4 e 13, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 4		Experimento 13	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,1016	± 0,0058	0,1008	± 0,0015
1	0,1202	± 0,0004	0,1095	± 0,0006
2	0,1271	± 0,0008	0,1333	± 0,0007
3	0,1360	± 0,0017	0,1349	± 0,0006
4	0,1427	± 0,0011	0,1384	± 0,0005
6	0,1688	± 0,0028	0,1494	± 0,0012
8	0,1952	± 0,0013	0,1822	± 0,0035
10	0,2083	± 0,0032	0,1868	± 0,0032

Tabela D.6. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 2, 9 e 16, realizados na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 2		Experimento 9		Experimento 16	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,0565	± 0,0350	0,0779	± 0,0027	0,0620	± 0,0017
1	0,0673	± 0,0029	0,0939	± 0,0015	0,0787	± 0,0078
2	0,0778	± 0,0011	0,1161	± 0,0015	0,0945	± 0,0048
3	0,1043	± 0,0026	0,1584	± 0,0019	0,1066	± 0,0092
4	0,1354	± 0,0065	0,1832	± 0,0011	0,1365	± 0,0087
6	0,1879	± 0,0132	0,2552	± 0,0073	0,1806	± 0,0035
8	0,1978	± 0,0019	0,2612	± 0,0063	0,2322	± 0,0070
10	0,2386	± 0,0023	0,2978	± 0,0068	0,2450	± 0,0165

Tabela D.7. Teor de açúcar (g de glicose por g de amostra) das amostras de physalis dos experimentos 15, 17 e 18, realizados na temperatura de 55 °C e concentração da solução osmótica de 55 °Brix, após o pré-tratamento de sonda de ultrassom, em diferentes tempos de imersão.

Tempo (h)	Experimento 15		Experimento 17		Experimento 18	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	0,0991	± 0,0010	0,0969	± 0,0022	0,0986	± 0,0042
1	0,1074	± 0,0012	0,1194	± 0,0005	0,1073	± 0,0017
2	0,1227	± 0,0017	0,1204	± 0,0006	0,1123	± 0,0030
3	0,1194	± 0,0011	0,1278	± 0,0013	0,1184	± 0,0005
4	0,1160	± 0,0020	0,1329	± 0,0008	0,1251	± 0,0033
6	0,1412	± 0,0027	0,1441	± 0,0048	0,1444	± 0,0056
8	0,1641	± 0,0092	0,1623	± 0,0082	0,1727	± 0,0064
10	0,1786	± 0,0013	0,2245	± 0,0029	0,2002	± 0,0069

Apêndice E

Dados complementares – Resultados da Análise de Carotenoides Totais

A seguir são apresentados os resultados experimentais da análise de carotenoides totais (em base seca), expressos em all-*trans*- β -caroteno das amostras de *physalis in natura* e após o tratamento osmótico por 10 horas para cada condição experimental avaliada.

É importante ressaltar que a metodologia de análise dos carotenoides totais presentes na *physalis* antes do processamento e após 10 horas de desidratação osmótica utilizada no presente trabalho envolve etapas, tais como: extração exaustiva, partição e posterior leitura em espectrofotômetro. De acordo com os estudos realizados por Rodriguez-Amaya (2010), e pelo fato dessa metodologia envolver etapas complexas que exigem longos tempos de análise, a ocorrência de valores de desvio padrão altos é comum e recorrente. Portanto, a fim de avaliar e garantir a significância dos resultados encontrados deve-se utilizar como parâmetro o coeficiente de variação (que relaciona o valor médio e o desvio padrão da análise). Essa metodologia IUPAC foi avaliada pelo *The Journal of AOAC International* (1980) reproduzido com permissão por Soares (2006) e demonstra que valores de coeficiente de variação até 16 % são aceitáveis, uma vez que a concentração de carotenoides presente na *physalis* está na ordem de grandeza de μg (correspondente a 10^{-6} g) por g de amostra.

Tabela E.1. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 1 e 10, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 40 °Brix.

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 1	247,46	± 6,76	2,7	275,03	± 1,82	0,7	1,11
Experimento 10	250,64	± 16,28	5,9	279,95	± 10,26	3,7	1,12

Tabela E.2. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 3 e 12, realizados na temperatura de 40 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix.

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 3	198,59	± 19,81	9,9	232,88	± 0,01	0,1	1,17
Experimento 12	237,61	± 16,74	7,0	247,15	± 23,62	9,6	1,04

Tabela E.3. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 6, 7, 8, 11, 14 e 19, realizados na temperatura de 55°C e concentração da solução osmótica de 55°Brix .

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 6	244,77	$\pm 4,04$	1,6	187,13	$\pm 2,38$	1,3	0,76
Experimento 7	219,90	$\pm 5,82$	2,2	166,92	$\pm 5,81$	4,6	0,76
Experimento 8	172,12	$\pm 4,61$	3,7	119,39	$\pm 6,16$	5,2	0,69
Experimento 11	283,64	$\pm 20,73$	7,3	185,06	$\pm 3,62$	1,9	0,65
Experimento 14	340,18	$\pm 3,74$	1,1	252,58	$\pm 7,02$	2,8	0,74
Experimento 19	263,52	$\pm 27,72$	10,5	175,52	$\pm 8,42$	4,8	0,67

Tabela E.4. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 4 e 13, realizados na temperatura de 70°C e concentração da solução osmótica de 40°Brix .

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 4	289,04	$\pm 26,95$	9,3	156,88	$\pm 0,89$	0,6	0,54
Experimento 13	281,79	$\pm 4,93$	1,7	167,73	$\pm 13,26$	7,9	0,60

Tabela E.5. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 2, 9 e 16, realizados na temperatura de 70°C e concentração da solução osmótica de 70°Brix .

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 2	321,48	$\pm 18,79$	5,8	151,63	$\pm 7,31$	4,8	0,47
Experimento 9	175,18	$\pm 1,05$	0,6	87,30	$\pm 2,28$	2,6	0,50
Experimento 16	282,10	$\pm 8,22$	2,9	153,83	$\pm 7,06$	4,6	0,55

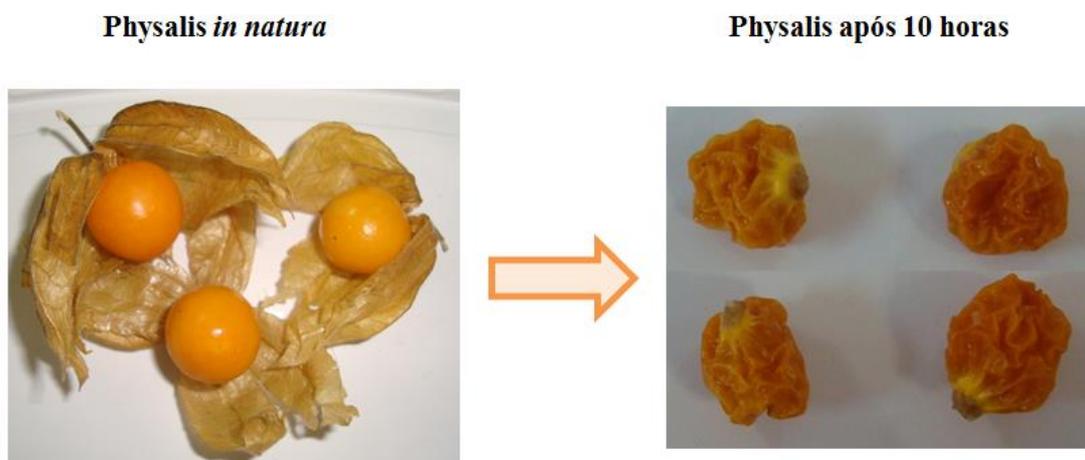
Tabela E.6. Resultado da análise de carotenoides totais (μg de all-*trans*- β -caroteno por g de amostra) para a *physalis in natura* ($t = 0$ h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, para os experimentos 15, 17 e 18, realizados na temperatura de 55°C e concentração da solução osmótica de 55°Brix , após o pré-tratamento de sonda de ultrassom, em diferentes tempos de imersão.

	Média	Desvio padrão	CV (%)	Média	Desvio padrão	CV (%)	Carotenoides (t) / Carotenoides (0)
	Physalis (t = 0 h)			Após t = 10 h			
Experimento 15	237,06	$\pm 20,29$	8,6	203,23	$\pm 7,17$	3,5	0,86
Experimento 17	257,29	$\pm 9,29$	3,6	190,90	$\pm 9,10$	4,8	0,74
Experimento 18	194,21	$\pm 7,82$	4,1	146,93	$\pm 3,76$	2,6	0,76

Apêndice F

Dados complementares – Aspecto físico das amostras de physalis

Figura F.1. Aspecto físico das amostras de physalis *in natura* e após 10 horas de processamento via desidratação osmótica na temperatura de 70 °C e concentração da solução osmótica de 70 °Brix, respectivamente.



Apêndice G

Dados complementares – Resultados da Análise Colorimétrica

A seguir são apresentados os resultados experimentais e a análise estatística dos parâmetros de cor, tais como: valores de L^* (luminosidade), a^* (parâmetro de cor variando entre verde e vermelho), b^* (parâmetro de cor variando entre azul e amarelo), C_{ab}^* (cromaticidade) e h_{ab} (ângulo de tonalidade) das amostras de physalis *in natura* e após o tratamento osmótico por 10 horas para cada condição experimental avaliada.

Tabela G.1. Resultados da análise de cor para a physalis *in natura* (t = 0 h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, bem como o resultado da análise estatística referente aos dados do parâmetro L^* (luminosidade) de cor.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	L^* (Luminosidade)				Teste-F p valor	Teste-t
		Início (t = 0 h)		Final (t = 10 h)			
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão		
40	40	28,36	0,22	28,96	0,35	0,05	0,56
40	70	30,32	2,76	29,16	0,35	0,09	0,31
70	40	29,80	1,67	29,17	0,42	0,42	0,15
55	55	28,90	1,48	28,97	0,66	0,07	0,90
70	70	28,40	0,40	27,71	0,39	0,08	0,93
Sonda de Ultrassom		29,71	2,38	29,85	1,45	0,28	0,92

Tabela G.2. Resultados da análise de cor para a *physalis in natura* (t = 0 h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, bem como o resultado da análise estatística referente aos dados do parâmetro a^* (verde/vermelho) de cor.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	a^* (Parâmetro de cor - verde/vermelho)				Teste-F	Teste-t	
		Início (t = 0 h)		Final (t = 10 h)				p valor
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão			
40	40	6,19	0,20	6,78	0,33	0,09	0,42	
40	70	6,78	0,46	7,00	0,38	0,45	0,59	
70	40	6,55	0,11	7,30	0,56	0,09	0,16	
55	55	6,35	0,81	7,87	0,45	0,07	0,05	
70	70	5,81	0,19	7,73	0,38	0,47	0,06	
Sonda de Ultrassom		6,32	0,84	7,84	0,76	0,41	0,07	

Tabela G.3. Resultados da análise de cor para a *physalis in natura* (t = 0 h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, bem como o resultado da análise estatística referente aos dados do parâmetro b^* (azul/amarelo) de cor.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	b^* (Parâmetro de cor - azul/amarelo)				Teste-F	Teste-t	
		Início (t = 0 h)		Final (t = 10 h)				p valor
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão			
40	40	13,41	0,30	14,36	0,41	0,07	0,61	
40	70	15,64	3,45	15,41	1,37	0,41	0,91	
70	40	14,61	1,55	14,69	0,76	0,88	0,87	
55	55	13,96	1,77	15,02	0,77	0,09	0,15	
70	70	13,18	0,46	12,73	0,69	0,13	0,68	
Sonda de Ultrassom		14,63	2,87	15,65	1,77	0,27	0,57	

Tabela G.4. Resultados da análise de cor para a *physalis in natura* (t = 0 h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, bem como o resultado da análise estatística referente aos dados do parâmetro C_{ab}^* (cromaticidade) de cor.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	C_{ab}^* (Cromaticidade)				Teste-F p valor	Teste-t
		Início (t = 0 h)		Final (t = 10 h)			
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão		
40	40	14,77	0,32	15,88	0,48	0,07	0,66
40	70	17,06	3,36	16,93	1,39	0,40	0,95
70	40	16,03	1,41	16,41	0,75	0,32	0,21
55	55	15,34	1,89	16,96	0,84	0,06	0,10
70	70	14,40	0,46	14,90	0,61	0,10	0,23
Sonda de Ultrassom		15,94	2,95	17,52	1,85	0,28	0,42

Tabela G.5. Resultados da análise de cor para a *physalis in natura* (t = 0 h) e para as amostras após 10 horas de desidratação osmótica, bem como o resultado da análise estatística referente aos dados do parâmetro h_{ab} (ângulo de tonalidade) de cor.

Temperatura (°C)	Concentração da solução osmótica (°Brix)	h_{ab} (Ângulo de tonalidade)				Teste-F p valor	Teste-t
		Início (t = 0 h)		Final (t = 10 h)			
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão		
40	40	65,23	0,62	64,74	0,79	0,09	0,30
40	70	66,14	2,66	65,51	1,05	0,49	0,59
70	40	65,69	2,27	63,57	1,99	0,42	0,30
55	55	65,49	1,56	62,33	1,03	0,14	0,05
70	70	66,03	0,73	60,22	0,52	0,33	0,06
Sonda de Ultrassom		66,43	1,73	63,34	1,60	0,47	0,06